

الدكتورة  
سميرة الحصري  
أستاذة في كلية العلوم  
جامعة دمشق

# أحيولوجيا الفيزيائية

٢٠٠



١٤١٨ - ١٤١٩ هـ

١٩٩٧ - ١٩٩٨ م

منشورات جامعة دمشق



الدكتورة  
سميرة (الطهري)  
أستاذة في كلية العلوم  
جامعة دمشق

# الحولجيا الفيزيائية

- ٢ -

(حقوق التأليف والطبع والنشر محفوظة لجامعة دمشق)

منشورات جامعة دمشق

١٤١٨ - ١٤١٩ هـ

١٩٩٧ - ١٩٩٨ م



## المنهاج النظري لمقرر الجيولوجيا (٢) لطلاب السنة الأولى للعلوم الجيولوجية

### العوامل الخارجية المؤثرة في القشرة الأرضية

- التحوية وتشكل الترب
- تدد الكتل
- المياه الجارية السطحية.
- المياه الجوفية
- الجليديات
- الرياح والصحارى
- المحيطات والبحار
- البحيرات والمستنقعات

### العوامل الداخلية المؤثرة في القشرة الأرضية

- الزلازل
- البراكين
- تشوه الصخور وتشكل الجبال



# مُقَدِّمَةٌ

## الطبعة الأولى

تعد الجيولوجيا الفيزيائية مدخلاً لدراسة علوم الأرض، فهي تهتم بالدرجة الأولى كل الراغبين في الاستفادة من هذا العلم، لأنها تزودهم بالمفاهيم الأساسية للجيولوجيا، وتجعلهم ينظرون إلى الطبيعة المحيطة نظرة علمية ثاقبة، تساعد على فهم تشكل القشرة الأرضية، وملاحقة تطوراتها من خلال العوامل الخارجية التي تقع تحت ملاحظتنا المباشرة، بالإضافة إلى العوامل الداخلية التي تنعكس بأحداث وظواهر خارجية كالهزات الأرضية والحادثات البركانية، كما تساعد على تفهم انعكاس هذه العوامل على طبيعة الصخور وتشكلها.

ونظراً لأن منهاج الجيولوجيا الفيزيائية واسع للغاية، فقد كان الاكتفاء بمعالجة الفصول الرئيسة بإيجاز أمراً ضرورياً، ليتسنى للطلاب فهم الأسس الجيولوجية التي تمكنه من متابعة دراسته.

وقد رأيت تطبيقاً للنظام الفصلي التي تسير عليه الجامعة حالياً، أن أعالج موضوعات الجيولوجيا الفيزيائية بجزئين: يغطي الأول منها مقرر الجيولوجيا (١) والثاني مقرر الجيولوجيا (٢) لطلاب السنة الأولى للعلوم الجيولوجية. يبحث الجزء الأول بإيجاز في منشأ الأرض وخواصها الفيزيائية وأغلفتها وكذلك في الصخور والفقرات المولفة لها. أما الجزء الثاني فهو موضوع هذا الكتاب، ويبحث في تأثير

العوامل الجيولوجية الخارجية والداخلية، في صخور القشرة الأرضية والتضاريس الناجمة منها.

وقد رأيت لتحقيق الغاية المطلوبة أن أعالج موضوعات هذا الكتاب في ثلاثة أقسام، يبحث القسم الأول في الجيوديناميك الخارجي، أي في الفعل الجيولوجي للعوامل الخارجية، مثل التجوية وحركة الرياح والأمطار والجاري المائية وعمل الجليديات ومياه البحار والبحيرات. بينما يعالج القسم الثاني القوى الكامنة التي تظهر أعمالها بنهوض السلاسل الجبلية وثوران البراكين. أما القسم الثالث فقد خصص بملخص عن تطبيقات الجيولوجيا، حيث يكون طلاب السنة الأولى على بينة بمجال تطبيق معلوماتهم الجيولوجية في الحقول العلمية، واختيار النواحي التي يبدون في نفوسهم ميلا لها حتى ينصرفوا نحوها.

وقد بذلت جهدا في اختيار أوفق التعبيرات العربية التي تقابل المصطلحات الأجنبية، وتوخيت في الكتابة سهولة الأسلوب وبساطة اللغة وتسلسل الأفكار، وعززت الكتاب بعدد من الرسوم التوضيحية التي تساعد على تفهم موضوعاته، وتتبع محتواها. كما أرفقت في نهاية الكتاب، قائمة ببعض المصطلحات الجيولوجية التي استعملتها، واستعنت في إعدادها بالمصطلحات الجيولوجية الواردة في المعجم الموحد للمصطلحات العلمية بمراحل التعليم العام الذي أصدرته المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم التابعة لجامعة الدول العربية عام ١٩٧٧.

واني أمل أن يفيد هذا الكتاب خاصة طلاب الجيولوجيا، وطلاب العلوم الطبيعية والجغرافيا والعلوم الهندسية والعلوم الزراعية، وهو بالإضافة الى ذلك يفيد هواة الطبيعة حيث يجدون فيه شرحا لجميع الظواهر الطبيعية التي تستهويهم.

ان هذا الكتاب يمثل مجهوداً تدريسياً للجيولوجيا الفيزيائية مدة تنوف على ست سنوات في قسم الجيولوجيا بجامعة دمشق، فهو محاولة علمية متواضعة، قد لا تخلو من بعض الثغرات، واني لاشكر كل من يتقدم برأي أو نصيح، أو نقد بناء يساعد على تدارك التقصير في المستقبل، والله ولي التوفيق.

دمشق ١٩٨٠



# مُقَدِّمَةٌ

## الطبعة الثانية

يسرني أن أقدم لطلاب السنة الأولى المتخصصين في العلوم الجيولوجية في الجامعات السورية وغيرها من الجامعات في أنحاء الوطن العربي الكبير، الطبعة الثانية من كتاب الجيولوجيا الفيزيائية (٢).

لقد قطعت العلوم الجيولوجية شوطاً كبيراً في مضمار التطور والتوسع خلال العقود الثلاثة الماضية، وبخاصة فيما يتعلق بمفاهيم الجيولوجيا العامة المرتبطة بتكتونية الصفائح. التي اعتمدت على دراسة جيولوجيا البحار والمحيطات من خلال التطبيقات الجيوفيزيائية، ورصد أعماق المحيطات وتصويرها، وأخذ عينات من صخورها، ودراسات المغنطيسية القديمة، وتتبع النشاطات النارية والزلزالية التي قادت مجملها إلى توضيح الحركات المستمرة لقطع الغلاف الصخري وأسبابها وما ينجم منها، من توسع قاع المحيطات وتشكل أجزاء جديدة من الغلاف الصخري مقابل زوال الأجزاء القديمة منه، وما يرافق معها من نشاطات نارية وبركانية -وغير القارات ونشوء الجبال وحدوث الزلازل وكل ما يتعلق بها من أحداث جيولوجية تجري على كوكبنا منذ وجوده حتى وقتنا الحاضر.

إن هذه المعرفة العلمية الجيولوجية الحديثة التي تراكمت معطياتها ونتائجها، خلال فترة زمنية قصيرة، فرضت نفسها لتدخل في الأطر الأساسية التعليمية في

الجيولوجيا. وهذا دافع علمي جيد شجعتني للقيام بإجراء تعديلات جذرية على كتاب الطبعة الأولى.

تتناول موضوعات هذا الكتاب جوانب مهمة من العمليات الجيولوجية الطبيعية التي ترتبط بمختلف النشاطات الخارجية والداخلية للأرض، وآخر ما توصلت إليه المعرفة العلمية في وصف مظاهرها وتعليل أسبابها وطرائق الاستفادة منها وتجنب أخطارها.

وقد كانت هذه التعديلات والإضافات في الإخراج الجديد لهذا الكتاب ركناً أساسياً يساهم مساهمة فعالة في توضيح أفكار موضوعاته ليتمكن الطالب من استيعابها بطريقة سهلة وواضحة. وقد زود بأفضل الأشكال الايضاحية التي أعطيت اهتماماً خاصاً من أجل دعم مختلف المعلومات الواردة فيه. كما روعي تسلسل الموضوعات وتتابعها وترابط الأفكار وتكاملها، بحيث يزود الطالب بقاعدة متينة من المعرفة الأساسية التي تساعد على متابعة دراسته في المقررات الجيولوجية المتنوعة والموسعة خلال السنوات التالية.

وكل ما أتمنى أن أكون قد وفقت في المساهمة في تأمين مرجع علمي يتطرق إلى جوانب مهمة من العلوم الجيولوجية، ويساهم مساهمة متواضعة في إغناء المكتبة العربية بالمراجع العلمية والله الموفق.

المؤلفة

# القسم الأول

العوامل الجيولوجية الخارجية

أو

الجيوديناميك الخارجي



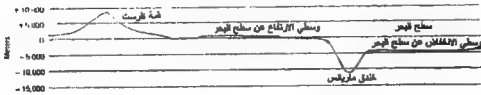
# مَهَيِّدٌ

## سطح الأرض المتغير

كيف يظهر لنا سطح الأرض إذا تصورنا أننا ننظر إليها من سفينة فضاء، وإن بحارها ومحيطاتها قد فرغت مياهها، ففي هذه الحالة علينا أن نتفحص سطحها الخارجي بدقة وعناية بغية نحري هيئاتها السطحية، التي تشمل اختلافاً كبيراً بين أعلى سلاسلها الجبلية وأعمق قيعان محيطاتها يبلغ نحو (٢٠) كيلو متراً. ويمكن تشبيه أعلى السلاسل الجبلية الموجودة على سطح الأرض بقصاصة من القماش ملتصقة على سطح كرة القدم. وتظهر الصورة الفضائية للأرض من مسافات بعيدة جداً، أن الهياكل السطحية للمرتفعات والمنخفضات لا يمكن تمييزها. ولكن مع الاقتراب من الأرض تدريجياً يبدأ تمييز هذه الهياكل، وأول ما يظهر فيها هو توزع القارات والمحيطات، ثم تظهر تدريجياً معالم أكثر تفصيلاً وهي خنادق المحيطات والسلاسل الجبلية العالية في القارات، ويزداد التمييز لتفاصيل أكثر بالاقتراب من الأرض.

يبلغ ارتفاع قمة افرست Everest في جبال هيمالايا (٨٨٤٨) متراً عن سطح البحر، كما يصل خندق ماريانس Marians في المحيط الباسيفيكي إلى (١١٠٣٤) متراً تحت سطح البحر، وإن المساحة التي تشغلها السلاسل الجبلية العالية والأغوار العميقة في خنادق المحيطات لا تشكل سوى مساحة بسيطة جداً من المساحة الاجمالية لسطح الأرض، فالأجزاء السطحية التي يزيد ارتفاعها على (٧٠٠) متراً من سطح البحر أو تنخفض عنه أكثر من (٧٠٠٠) متر تقل عن ١٪ من مساحة

سطح الأرض. ويظهر لنا أيضاً من خلال دراسة سطح الأرض حقيقة أن التضاريس تتوزع بشكل مميز في مستويين رئيسين: أحدها وسطي ارتفاعه عن سطح البحر يبلغ (٥٠٠) متر والآخر وسطي انخفاضه عن سطح البحر يبلغ (٤٥٠٠) متر. أي أن الفارق بين المستويين الواسطين للمرتفعات والمنخفضات هو محدود (٥٠٠٠) متر. يضاف إلى ذلك أن أكثر من ثلثي مساحة الأرض يتوزع في مجال فارق وسطي يبلغ (١٠٠٠) متر في القارات والمحيطات (الشكل ١ - ١).



شكل ١-١: تمثيل بياني يوضح قمة القربس وخندق ماريان. ووسطي الارتفاع والانخفاض عن مستوى سطح البحر.

ومن هذه الملاحظات لسطح الأرض يمكن التساؤل عن العمليات المسؤولة عن إعطاء سطح الأرض شكلها. هنالك عمليات تجري باستمرار وتتم غالباً بواسطة الطاقة الشمسية، التي تبخر المياه من سطح المحيطات والبحار والبحيرات والأنهار، وتأتي الرياح لتتوزع بخار الماء خلال المستويات الدنيا من الغلاف الجوي atmosphere، فتتشكل الغيوم وتساقط الأمطار والثلوج على سطح الأرض، وتتجمع على شكل أنهار وجليديات وغالباً ما تعود وتصب في المحيطات والمصادر المائية الأخرى. فهذه الدورة المائية تلعب دوراً كبيراً في العمليات الجيولوجية التي تعمل على التغير المستمر في سطح الأرض، لأنها تتضمن قوى تحرك الرياح والمياه والجليديات التي تؤدي إلى تحطيم الصخور وتهدمها. فإذا كانت هذه العمليات التهدمية هي التي تعمل لوحدها، فإن مرتفعات القارات سوف تتهدم تدريجياً وتذهب إلى البحار في غضون (٥٠) مليون سنة. وهذا لا يحدث في الطبيعة، إذ توجد إلى جانبها عمليات النشاط البركاني وبناء الجبال التي تعمل على زيادة رفع

الأراضي في إتجاه مضاد للثقالة. وتعتمد هذه العمليات على الحرارة الداخلية للأرض كمصدر من مصادر الطاقة، ومن هنا نستنتج أن عمليات التهديم والبناء تعمل باستمرار وتعطي اليابسة أشكالها بمرور الزمن.

### تهديم اليابسة أو اهترؤها Wearing away of the land

تشكل معظم الصخور على أعماق مختلفة من سطح الأرض. فبعضها يتشكل من تحول الصخور الرسوبية الموجودة في أعماق القشرة الأرضية، وبعضها الآخر يتشكل من مغامات الأعماق أو من المعطف على أعماق نحو (٣٥٠) كيلو متراً.

حين تتكشف هذه الصخور على السطح، بنتيجة حركات تكتونية أو تعرية الصخور المغطية لها، تصبح معرضة لبيئة سطحية مغايرة تماماً لبيئة تشكيلها، واستجابة لذلك تبدي الصخور درجات مختلفة من الصمود أمام الشروط البيئية الجديدة، إلا أنها لا بد أن تتغير تدريجياً حتى تصل مرة أخرى إلى حالة من التوازن مع هذه الشروط. وهذا التغير للصخور يعرف بالتجوية weathering. أما إزالة المواد الناتجة من التجوية فتعرف بالتعرية demudation. وتكون الطاقة الشمسية والثقالة الأرضية التي تحرك المواد لأسفل المنحدرات عوامل مهمة في هذه العمليات.

تؤدي التجوية إلى التفتت الميكانيكي والتفكك الكيميائي للصخور والفلازات الموجودة على سطح الأرض وتشكل متحجرات جديدة منها. أما التعرية فتعمل على تجميع وإزالة نواتج التجوية من مصدرها. ويقصد بالتعرية في كثير من الأحيان بأنها عمليات تؤدي إلى اهتراء اليابسة وتشمل التجوية وإزالة المواد الجحوة، أما النقل transportation فهو عمليات نقل المواد الناتجة من اهتراء اليابسة من مكان لآخر.

وتتحقق التعرية، بما فيها النقل، بعوامل الرياح والسيول والأنهار والجليديات والأمواج والتيارات البحرية وللمياه المتسربة في باطن الأرض. أما الترسيب deposition فهو تراكم المواد المنقولة في الأماكن التي تتوقف فيها عوامل النقل. وبالنسبة فإن جزءاً من الرسوبات يمكن أن يبقى في أماكن معينة لفترات كافية لكي تتلاحم ويرتص بعضها مع بعض لتشكيل الصخور الرسوبية sedimentary rocks، إن تشكل هذه الصخور يعاكس عمليات التهديم ويؤدي إلى البناء وبذلك تستمر الحلقة.

# الفصل الأول

## التجوية وتشكل الترب

**التجوية** هي مجموعة التغيرات الفيزيائية والكيميائية التي تطرأ على الفلزات والصخور الموجودة على سطح الأرض بتماسها مع الغلاف الجوي والمائي والحيوي. وتعمل التجوية الفيزيائية **physical weathering** على تحطيم وتفتيت الصخور بتأثير قوى طبيعية دون أن تتغير في تركيبها الكيميائي. أما التجوية الكيميائية **chemical weathering** فتحدث بتفاعلات كيميائية بين الفلزات المولفة للصخور والمواد الموجودة في البيئة المحيطة، وبخاصة الماء والحموض والأوكسجين، مودية لتشكيل فلزات جديدة تختلف عن الفلزات الأولية. وغالباً ما يكون هذان النمطان من التجوية متضافين ويعملان معاً بالوقت نفسه، ولكنهما يختلفان بشدة التأثير، ويعتمدان بشكل رئيس على المناخ والتضاريس والزمن وتراكيب والصخور وبنياتها وغيرها من العوامل. وقد يضاف أحياناً إلى النوعين السابقين التجوية العضوية **organic weathering**. ولكن يبقى هذا النمط من التجوية تابعاً لمضمونه للتجوية الفيزيائية والكيميائية.

### ١- التجوية الفيزيائية:

تحدث التجوية الفيزيائية بنتيجة حركة المواد المولفة للصخر بتأثير عوامل مختلفة، تؤدي إلى تشويش روابطه الميكانيكية. ويلعب الدور الرئيس فيها العامل المسبب لحركة المادة الصخرية. ففي بعض الأحيان تحدث الحركة داخل الصخر نفسه دون أي سبب ميكانيكي خارجي. وهذا يشمل تغيرات في حجم مركبات الصخور



بتأثير تغيرات الحرارة (التجوية الحرارية thermal weathering). وفي حالات أخرى تحدث الحركة بفعل عوامل ميكانيكية خارجية مثل تجلد المياه ونمو البلورات وجذور الأشجار... الخ (التجوية الميكانيكية mechanical weathering).

## آ - التجوية الحرارية

لقد كان يعتقد أن تغيرات درجات الحرارة ما بين الليل والنهار في المناطق الصحراوية تؤدي إلى تسخين وتبريد غير متحانس للصخور، وبالتالي إلى تمدد وتقلص الحبات الفلزية على التوالي. وبالنظر لبطء اختراق الحرارة لأعماق الصخر، فالأجزاء السطحية تتمدد بنسبة أكبر من الأجزاء الداخلية، ويظهر نتيجة ذلك شقوق تمتد موازية للسطوح الصخرية وتتشقق أجزاءها السطحية. إلا أن التجارب المخبرية لم تؤيد هذا الاعتقاد، ففي إحدى التجارب سخنت الصخور إلى درجة حرارة أعلى بكثير من الحرارة العادية التي تتعرض لها الصخور السطحية، ثم بُردت، وتمت إعادة هذه العملية مرات عديدة لتمثل مفات مستين من التجوية، ولكن لم تظهر هذه الصخور سوى تغيرات طفيفة. ويعتقد أن حادثة التقشر الشائعة في المناطق الصحراوية تحدث بسبب عوامل أخرى سوف تناقش فيما بعد، ولكن يمكن القول أن التبريد المفاجئ للصخور بواسطة الأمطار يؤدي إلى قوى ضغط غير متحانس على الحبات الصخرية ويمكن أن يساعد على هذه العملية.

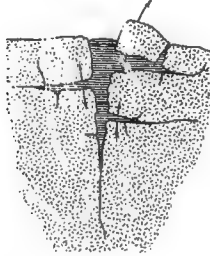
ومن المحتمل أن تكون النار عاملاً مهماً في التكسر الميكانيكي للصخور، التي يمكن ملاحظتها بوضوح في حالة حرائق الغابات، حيث يؤدي التسخين الشديد للصخور إلى تمدد الطبقات السطحية، وتفلقها، وتطايير شظايا منها بحجوم مختلفة.

## ب - التجوية الميكانيكية

### ب-١- التجلد الاسفيني Frost wedging

إن تأثير تجلد المياه في الصخور أسرع بكثير من تأثير بقية العوامل. حيث تتسرب المياه خلال شقوق وفراغات الصخور، وتتجمد عند انخفاض درجة الحرارة مع ازدياد في الحجم بمقدار ٩٪، لأن جزيئات الماء ترتب نفسها في هيكل بللوري مفتوح عند التبلور، وتؤدي هذه الزيادة الحجمية إلى قوة ضغط كبيرة تقدر

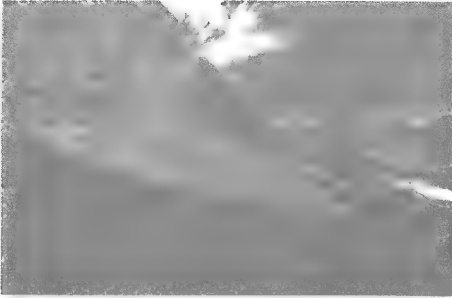
٢٠٠٠ كجم/م<sup>٢</sup>). وهذه التوه أكبر بـ (٤٠) مرة من القوة اللازمة لتحطيم صخر الغرانيت. وتتغلب هذه الضغوط على قوى روابط الصخر وتفتته إلى قطع مجحوم مختلفة، قد يزن بعضها أحياناً بضعة أطنان (شكل ٢-١).



شكل ٢-١: رسم تخطيطي يوضح آلية لتجلد الاسفييني.

يكون هذا النوع من التجوية واضحاً في المرتفعات الجبلية للمناطق المعتدلة، حيث توجد دورات يومية ما بين ارتفاع درجة الحرارة في النهار وانخفاضها دون الصفر في الليل، فالقوى الناجمة من تجلد المياه وذوبانها تؤدي إلى تكسر وتفتت الصخور، وتندرج المواد الناتجة إلى أسفل المنحدرات مشكلة منحدرات ركام الإنهيار talus slopes (شكل ٣-١).

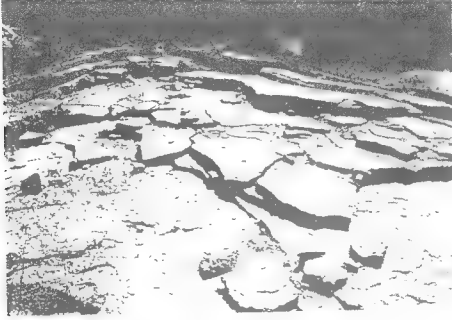
تكون آثار التجلد الاسفييني واضحة جداً في المناطق القريبة من القطب (وليس في القطب لأن الجليد نادرًا ما ينوب فيها)، حيث نجد فيها مساحات واسعة مغطاة بقطع ذات حجور مختلفة تعرف ببحار الحجاره stones seas. وقد يؤدي أحياناً التجلد الاسفييني إلى تخلخل الحبيبات الفلزية المكونة للصخور وتحررها مع مرور الزمن.



شكل (٣-١): منحدر ركام الانهيار (التلوس).

#### ب - ٢- تخفيف الحمل unloading

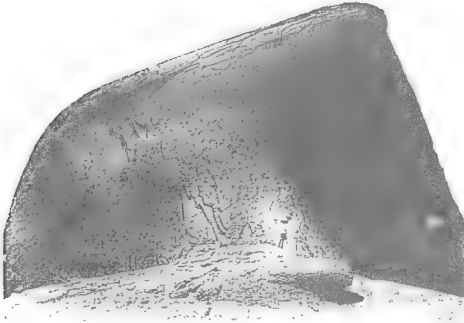
تحدث هذه العملية من التجوية في الأحسام النارية الضخمة بخاصة تلك المكونة من الغرانيت. عندما تتحرر هذه الصخور من الضغوط الواقعة عليها، فأجزاءها الخارجية تتمدد أكثر من العميقة، وتنفصل عن بقية الجسم الصخري على شكل غطاءات sheets تشبه إلى حد ما ورق اللعب المكس ببعضه فوق بعض (شكل ٤-١).



شكل (١-١): يوضح التصلح في الصخور الغرانيتية.

تخضع الصخور الواقعة تحت سطح الأرض إلى ضغوط عالية بسبب وزن الصخور المقطية لها. وحين تزداد هذه الصخور بالتعرية فإن الضغط ينخفض، فتتجارب الصخور العميقة بتمددتها نحو الأعلى وتتطور فيها شقوق وفواصل متقاربة تكون عادة على شكل مجموعات. وتنشأ من الفواصل التي تتطور بموازاة سطح الأرض غطاءات صخرية واسعة لا تزيد سماكتها على (١٠) سنتيمترات بالقرب من السطح، وتزداد سماكتها مع العمق، ثم تختفي على أعماق نحو (٥٠) متراً، كما أن استمرار عملية التجوية يؤدي إلى انفصال الصفائح وإزالتها، وتعرف

هذه العملية بالتصفح sheeting. وأحياناً يأخذ الجسم الناري المتقشر شكل القبة كما هو الحال في قبة هاف دوم Half Dome الموجودة في منتزه اليوسيميت Yosemite Park في الولايات المتحدة (شكل ٥-١)



شكل (٥-١): قبة هاف دوم وهي قبة تقشر في منتزه اليوسيميت.

ومع أن معظم الشقوق fractures والفواصل joints السابقة تشكلت بنتيجة عملية التمدد. إلا أن بعضها ينشأ من التقلص عند تصلب الغمما، وبعضها الآخر ينشأ عن القوى التكتونية المرافقة لبناء الجبال. فالشقوق والفواصل هي من البنيات المهمة التي توجد في الصخور، وتسمح بمرور الماء إلى أعماقها حيث تبدأ فيها عملية التجوية قبل وصولها إلى سطح الأرض بوقت طويل.

### ب-٣- تبلور الأملاح Crystallization of salts

يؤدي تبلور الأملاح في شقوق ومسامات وفجوات الصخور إلى قوى كافية لتفتيت هذه الصخور. وتلاحظ هذه الظاهرة بشكل جيد تحت شروط المناخ

الجفاف في المناطق الصحراوية، حيث يؤدي ارتفاع درجة الحرارة في النهار إلى صعود المياه الجوفية بالخاصة الشعرية إلى السطح فتتبخر وتبلور الأملاح المنحلة ضمن الشقوق والمسامات مولدة ضغطاً كبيراً تحطم الصخور.

#### ب ٤- نشاط العضويات Organisms activities

تمم التجوية أيضاً بوساطة نشاط النباتات والحيوانات ونشاط الإنسان. فنمو جذور النباتات في الشقوق والمسامات الصخرية يطبق ضغطاً كبيراً على جدرانها ويؤدي إلى تفلق الصخور (شكل ٦-١). وبالوقت نفسه تفرز نهايات جذورها حموضاً تؤدي إلى حل الصخور، وهذا متوافق مع هضم عناصر مختلفة لتغذيتها. أما جذور النباتات الميتة فتنتج بمياه الأمطار وتؤدي إلى تفكك الصخور ميكانيكياً، وتنتج من تحللها أحماض تزيد في التجوية الكيميائية.



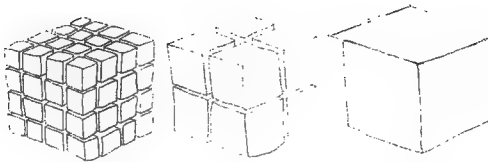
الشكل (٦-١): تساهم جذور النباتات في التجوية الميكانيكية بتوسيع الشقوق في الصخور.

وكذلك فإن الديدان الأرضية والنمل والقوارض **rodents** تلعب دوراً في الحفر تحت الأرض، ونقل جزيئات الصخور إلى السطح وجعلها عرضةً إلى التجوية الفيزيائية والكيميائية. وقد أجرى العالم شارلز داروين **Charles Darwin** حسابات دقيقة على كميات المواد المفتتة المنقولة إلى السطح بواسطة الديدان الأرضية، فكانت بمعدل (٢,٥) كغ/م<sup>2</sup> في السنة. وكتب أيضاً الجيولوجي برانر **Branner** في دراسته لحوض الأمازون أن التربة تبدو وكأنها قلبت بواسطة النمل، وهذا يوضح أن الأعداد الهائلة والعمل المستمر لهذه الكائنات الضعيفة، خلال فترات طويلة من الزمن، يؤدي إلى تأثيرات كبيرة في تجوية الصخور. وكذلك فإن نشاط الإنسان يلاحظ بوضوح حين تقتلع الصخور للبحث عن الثروات المعدنية، أو تنفيذ المشاريع العمرانية. ولكن هذا النشاط يأتي في مرتبة ثانية في التجوية الميكانيكية بعد نشاط الحيوانات الحافرة.

## ٢- التجوية الكيميائية

تشمل التجوية الكيميائية عمليات معقدة ينتج منها تغير في البنية الداخلية للفلزات بإضافة بعض العناصر أو حذفها. ويؤدي هذا التغير إلى تفكك الصخر الأصلي، وتشكل مواد جديدة تكون متوازنة مع شروط البيئة السطحية. وتبقى منتجات التجوية هذه ثابتة ما دامت في بيئتها الجديدة.

تحطم التجوية الفيزيائية الصخور وتفتتها مما يزيد المساحة السطحية المعرضة لمؤثرات التجوية الكيميائية (شكل ٧-١)، بينما تكون التجوية الكيميائية بطيئة جداً في حال عدم تعرض الصخور لعمليات التجوية الفيزيائية. وفي الوقت نفسه الذي يضعف فيه الفساد الكيميائي للصخور يحدث المزيد من التجوية الفيزيائية، وكلتا العمليتين، يتضافر بعضهما مع بعض.



الحجم ٦٤ سم <sup>٣</sup>	الحجم ٨ سم <sup>٣</sup>	الحجم ١ سم <sup>٣</sup>
المساحة ٣٨٤ سم <sup>٢</sup>	المساحة ٢٤ سم <sup>٢</sup>	المساحة ٦ سم <sup>٢</sup>

شكل ٧-١: تزداد المساحة السطحية بنسبة كبيرة عندما يتحطم المتعب إلى كتل أصغر.

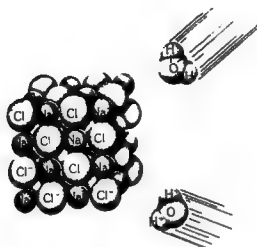
تتضمن عمليات التجوية الكيميائية الانحلال بالماء والحموض كما تتضمن الأكسدة والإماهة والحلمهة، وهذه العمليات تحرر أيونات تجعلها تدخل في محاليل. أو تشكل مواد فلزية جديدة تكون ثابتة كيميائياً في بيئتها الجديدة.

### ١- الانحلال بالماء Solution by water

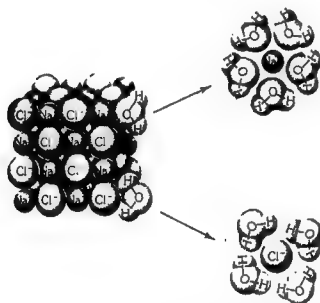
إن الماء عامل كيميائي فعال لأنه مؤلف من أيونات الهيدروجين  $H^+$  والهيدروكسيل  $OH^-$ ، وإن أيون الهيدروجين هو العامل الفعال في عمليات التجوية الكيميائية. فالحايت أو الملح الصخري، (وهو فلز كلور الصوديوم) أكثر الفلزات انحلالاً بالماء، مع أنه يحافظ على تعادل شحناته الكهربائية وتبقى أيوناته محتفظة بشحنتها. بالإضافة إلى هذا فإن جزيئات الماء ثنائية القطب (الشكل ٨-١)، فالطرف الذي فيه ذرة الاوكسجين له شحنة سالبة، والطرف الذي فيه ذرة هيدروجين له شحنة موجبة، فعندما تصطدم جزيئات الماء ببلورة الهايت فإن نهاياتها السلبية تتصل بأيونات الصوديوم الموجبة وتجذبها من البناء البلوري.



وكذلك الحال بالنسبة لأيونات الكلور التي تنجذب إلى النهايات الموجبة لجزيء الماء وبهذا يتشكل محلول كلور الصوديوم.



أ - مهاجمة أيونات الصوديوم والكلور بواسطة جزيئات الماء ثنائية القطب



ب - إحاطة أيونات الصوديوم والكلور، بعد انتزاعها ، بعدد من جزيئات الماء

شكل (٨-١): يوضح التحلل كلور الصوديوم في الماء

ويكون انحلال كلور الصوديوم بالماء الساخن أسرع منه في الماء البارد، لأن درجة الحرارة ترفع تركيز أيونات الهيدروجين، فإذا ارتفعت درجة الحرارة من الصفر إلى ٣٠° درجة مئوية ارتفع التركيز إلى الضعف. وبالرغم من أن معظم الفلزات تنحل بالماء، إلا أن وجود كمية ضئيلة من غاز CO<sub>2</sub> يجعله حمضياً ويزيد بشكل ملحوظ في انحلالها.

## ٢- الانحلال بالحموض Solution by acids

إن كثيراً من المياه الطبيعية ما هو في الحقيقة إلا حموض ضعيفة تشكلت في الطبيعة. وإن وجود كمية ضئيلة من الحموض في الماء يزيد في قدرته على التآكل. فأي حمض، بغض النظر عن نوعه، يحتوي على أيون الهيدروجين (H<sup>+</sup>)، الذي يتفاعل مع كثير من الفلزات ويساعد على تفتتها، فمثلاً الصخور الكلسية والدولوميتية من السهل جداً إذابتها بأضعف المحاليل الحمضية.

يتشكل حمض الكربون من انحلال غاز ثنائي أوكسيد الكربون (CO<sub>2</sub>) الموجود في الهواء في مياه الأمطار والمياه السطحية:



ويتأين حمض الكربون إلى أيون الهيدروجين وأيون البيكربونات على الشكل التالي:



وإن أيون الهيدروجين هو الفعال، حيث يتفاعل بسهولة مع جذر الكربونات الموجودة في الحجر الكلسي:



ففي هذا التفاعل يتأين أيونان من الهيدروجين مع أوكسجين واحد ليشكل الماء، وتنتحرر أيونات الكالسيوم، وينطلق ثنائي أوكسيد الكربون، ويبقى الكالسيوم منحللاً بالماء. ويمكن لغاز (CO<sub>2</sub>) أن يتفاعل ثانية مع الماء ليشكل أيضاً حمض الكربون.

و كذلك يتم تفاعل مماثل في الصخور الدولوميتية:



وينحل كل من الكالسيوم والمغنيزيوم في الماء، وتتحول في هذه العملية كربونات الكالسيوم والمغنيزيوم غير المنحلة إلى نواتج ذائبة. إن وجود أيونات الكالسيوم والمغنيزيوم في الماء يجعلانه ماءً عسراً. لذلك فإن المناطق التي تنتشر فيها الصخور الكلسية والدولوميتية تكون مياهها الجوفية عسرة، وتتشكل فيها المغاور والكهوف لإذلال هذه الصخور بالماء الحمضي.

كذلك يتشكل حمض الكبريت في الطبيعة من أكسدة فلزات الكبريتيدات كالبيريت Pyrite. وهو فلز شائع الانتشار في كثير من الصخور كما يوجد أيضاً في الفحم الحجري. يتأكسد البيريت الموجود فيها بملامسة أو كسجين الهواء ليعطي حمض الكبريت، الذي يغسل منها وينهب إلى الأنهار أو إلى المياه الجوفية:



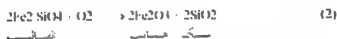
حمض الكبريت      كبريتات الحديدي      البيريت

يؤدي العمل المنجمي المكشوف إلى تعرض الفحم الحجري للهواء، و حدوث مشكلات تلوث بنزوح محلول حمضي من المنجم. وإن حمض الكبريت حمض قوي يتفاعل بسهولة مع معظم الصخور.

### ٣- الأكسدة oxidation

هي ضياع الإلكترونات بواسطة عناصر خلال التفاعل الكيميائي، وليس من الضروري أن تحدث هذه العملية خلال الاتحاد مع الأوكسجين. ولكن من الشائع في الطبيعة وجود الأوكسجين الحر في الغلاف الجوي وفي الفتحات الصخرية وفي مسام التربة، فمن السهل اتحاده مع العناصر الموجودة فيها. وبالرغم من أن عملية الأكسدة تتم ببطء كبير في البيئات الجافة، إلا أن وجود الماء يسرع التفاعل وتظهر هذه الحقيقة حين تقارن الحديد الذي يصدأ ببطء في المناخ الجاف وبسرعة في المناطق المعرضة للأمطار.

تعد عملية الأكسدة مهمة في تحلل الفلزات الخاوية على الحديد كالبيريت والأوليفين والبيروكسين والأمفيبول والغرينا، وفي عدد من الفلزات الشائعة الأخرى التي يكون فيها الحديد غالباً بحالة ثنائي التكافؤ  $Fe^{2+}$ ، وهذا يعني أنه فاقد للإلكترونين بالمشاركة أو الانتقال، وحين يتفاعل مع الأوكسجين يفقد إلكترونًا آخر ويصبح حديدًا ثلاثيًا لينتج أوكسيد الحديد ذا اللون البني المحمر والمسمى هيماتيت Hematite، وفقاً للمعادلتين التاليتين:



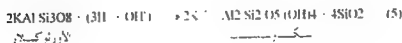
وحين تدخّل الماء كوسيط كيميائي، كما هو الحال في الطبيعة، يكون التفاعل حسب المعادلة التالية:



وتوضح هذه المعادلة أيضاً عملية الخمسة.

#### ٤ - الحلمة hydrolysis

وهي تفاعل أي مادة مع الماء، حيث أن جزيئات الماء تنفصل إلى أيونات الهيدروجين ( $H^+$ ) وأيونات الهيدروكسيل ( $OH^-$ )، وتكون هذه الأيونات جاهزة للدخول في كثير من التفاعلات الهامة التي تتضمن بخاصة التفاعلات مع معظم الفلزات السيليكاية ما عدا مجموعة الكوارتز. ففي حال حلمة فلزات الصفاح تتشكل فلزات الغضار وتنفل السبيكا والأيونات المعدنية على شكل محاليل. ويمكن أن نوضح ذلك بتفاعل فلزات صفاح الأورثوكلاز مع الماء:



في هذا التفاعل يهاجم أيون الهيدروجين أيون البوتاسيوم ليحل محله في الشبكة البلورية للصفايح. ويتحرر أيون البوتاسيوم مكوناً بيكربونات البوتاسيوم المنحلة. أو يبقى في نزبة لتغذية النباتات. وتشكل فلزات الغضار من إضافة أيونات الهيدروكسيل إلى البناء البلوري، كما ينفصل جزء من سيليكات الصفايح وينقل على شكل محاليل. وعادة تحوي المياه في الطبيعة على ثنائي أكسيد الكربون، مما يساهم بأيونات إضافية من الهيدروجين تعمل على الإسراع في عملية الحلمهة:



الأورثوكلاز

الكربونيت

## ٥- الإمالة hydration

وهي نمط آخر من التجوية الكيميائية. ففي هذه العملية تدخل جزيئات الماء مباشرة في بنية الفلز لتشكل فلزاً جديداً. فالجص Gypsum مثلاً يتشكل من إمالة الأنهدريت Anhydrite حسب المعادلة:



الأنهدريت

للجص

إن النقطة (٠) في صيغة فلز الجص هي رمز للدلالة على وجود جزيئات الماء في البنية البلورية crystal structure للجص.

## بعض نواتج التجوية Some results of weathering

ماذا يحدث عندما تتعرض الصخور الشائعة للتجوية الكيميائية؟ ولماذا يتجوى بعضها بسهولة أكثر من البعض الآخر؟ ومن أجل الإجابة على ذلك نفترض أننا نقارن البازلت مع الحجر الرملي، ولنلاحظ أولاً من الصخرين يتجوى بشكل أسرع مع اعتماد بيئات التشكل لهُذين الصخرين. فالبازلت صخر ناري مؤلف من فلزات تبلورت في درجات حرارة تكون غالباً أعلى من ١٠٠٠° درجة مئوية، من صهارة مغماية أتت من الأعماق، أي من بيئة تختلف تمام الاختلاف عن البيئة السطحية. وبالمقابل نجد أن الحجر الرملي مكون من حبات الكوارتز التي حررتها التجوية من صخور أقدم وتشكل بعمليات الترسيب.

إن البازلت والحجر الرملي مؤلفان من فلزات قاسية تقاوم البري والاهتراء بشكل جيد، وكلاهما يُتوقع استحبابه للتجوية الفيزيائية، ولكن الصخرين يختلفان كيميائياً. فالكوارتز في الحجر الرملي يقاوم المؤثرات الكيميائية، وكذلك المصلاط إذا كان من السيليكات أو الفصاار أو أكسيد الحديد، أما إذا كان مؤلفاً من الكالسيت فإن يتأثر بسرعة بالمياه. وبالمقابل، إن الفلزات المكونة للبازلت هي البلاجيوكلاز الكلسي والبيروكسين والأوليفين وهي مهيأة بطبيعتها للتجاوب مع التجوية الكيميائية وبخاصة الحلمهة والأكسدة.

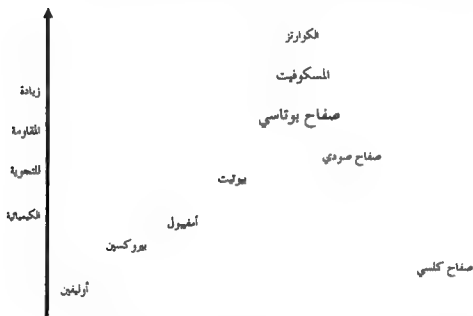
وفي هذا المجال سوف ندرس تجوية ثلاثة أنواع من الصخور الشائعة لنرى كيف تتجوى في مناخ معتدل ورطب، وما هي النواتج المتشكلة، وماذا يحدث لهذه النواتج.

## ٢ - تجوية الغرانيت

يتألف صخر الغرانيت من الصفاح البوتاسي والكوارتز وقليل من الهورنبلاند والبيوتيت. وعندما يتكشف هذا الصخر على سطح الأرض يتحطم بالتجوية الفيزيائية مما يؤدي إلى تسارع تجويته الكيميائية. وتأخذ عملية الحلمهة مجراها ويفسد أولاً الهورنبلاند والبيوتيت ثم الأورثوكلاز (المعادلة ٥)، وتحطم هذه الفلزات لتشكّل فلزات عضارية مع بعض السيليكات المنحلة. وتحرر أيونات الصوديوم والمغنيزيوم والكلسيوم من الهورنبلاند والبيوتيت، كما يتحرر أيون البوتاسيوم من البيوتيت والأورثوكلاز وجميعها تنقل على شكل محاليل. أما الحديد في الهورنبلاند والبيوتيت فيتأكسد إلى هيماتيت أو ليمونيت (المعادلتين ٢ و ٣). وهكذا يتحول الغرانيت المتماسك إلى غرانيت مفتت مع بقع صدفية من أكاسيد الحديد، وتغطي جباة الفلزية طبقات رقيقة من الفصاار. ومع استمرار عملية التجوية تفسل السيليكات والأيونات القلوية بالمياه الجارية، ويتضاءل الصخر تدريجياً ليصبح حطاماً مؤلفاً من حبات كوارتزيتية غير متماسكة مع بقايا من شظايا الأورثوكلاز إضافة إلى العضاريات، وغالباً ما يتلون هذا الحطام بأكاسيد الحديد. وفي النهاية تقوم الرياح والمياه الجارية بانتزاع الفصاار والأكاسيد وفصلها عن حبات الكوارتز. وبذلك تكون التجوية وعوامل النقل قد فصلت المكونات الأصلية

للغرانيت بعضها عن بعض. ويمكن أن تصل محاليل الصوديوم والأيونات الأخرى إلى البحر لتضاف إلى مخزونه الملحي الضخم، وأن تساق الغضاريات بالمجاري المائية والأنهار إلى البحار لتتراكم تدريجياً على شكل أوحال بحرية. أما حبات الكوارتز فتحترقها المياه الجارية على شكل رمال وترسب على امتداد مجاريها على شكل حواجز رملية يمكن أن تتعرب حين اشتداد التيارات المائية وتتابع عمليات النقل إلى أحواض الترسيب.

لقد وجد العلماء بنتيجة الدراسات أن قابلية الفلزات السيليكاكية للتأثر بالتجوية الكيميائية يكون بترتيب عكسي لتبلورها من المagma (شكل ٩-١)، فالفلزات السيليكاكية التي تبلور في درجات عالية من الحرارة كالأوليفين والأوجيست والهورنبلاند تتحوى بسرعة أكبر من الفلزات التي تبلور في درجات أخفض من الحرارة كالبيوتيت والصفاح البوتاسي. وإن الكوارتز الذي يتشكل بدرجات منخفضة من الحرارة هو أكثر الفلزات ثباتاً تجاه التجوية الكيميائية.



شكل (٩-١): يبين تسلسل للفلزات السيليكاكية حسب سرعة تأثرها بالتجوية الكيميائية.

يمكن أن تلخص نواتج التحوية الكيميائية للفسزات السيليكاية الشائعة في الجدول

التالي:

الفلزات	التركيب الكيميائي	أهم منتجات التحوية الكيميائية	
		فلزات	مواد منحلة
كوارتز	SiO <sub>2</sub>	جرات الكوارتز	
لورثوكلاز	KAISi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	- عضاريات - كوارتز (فلورات ناعمة)	- بعض السيلكا في محاليل كربونات البوتاسيوم
الصفراء	NaAISi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	- عضاريات	- بعض السيلكا
	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	- صويت - كوارتز (فلورات ناعمة)	- كربونات الكالسيوم والصوديوم
فلزات حديدية مغنيزية	سيليكات الألمنيوم حديدية مغنيزية كلسية	- عضاريات - كالسيت - ليموليت - هيماتيت - كوارتز (فلورات ناعمة)	- بعض السيلكا - كربونات الكالسيوم والصوديوم والمغنيزيوم
	FeMgSiO <sub>4</sub>	- ليموليت - هيماتيت - كوارتز (فلورات ناعمة)	- بعض السيلكا - كربونات المغنيزيوم والحديد

جدول ١- يبين نواتج التحوية الكيميائية للفلزات السيليكاتية الرئيسية المكونة للصخور النارية.



## ب - تجوية الغضار الصفحي

إن الغضار الصفحي shale صخر رسوبي مؤلف بمعظمه من فلزات غضارية مع قليل من حبات الكوارتز السلتية والملاط الكلسي مع بقايا ناجمة من تقحم المادة العضوية. ويكون الغضار الصفحي ضعيفاً بشكل عام تجاه العمليات الفيزيائية، كالتجند والتندي والجفاف، التي تساعد على تفتيته وفصل الحبات الغضارية بعضها عن بعض، لأنه طري وناعم الحبيبات وذو مسامية عالية، ولكن تقاوم فلزاته التجوية الكيميائية لأنها تنتج منها.

## ج - تجوية الحجر الكلسي

يتألف الحجر الكلسي من فلز الكالسييت الذي ينحل بسهولة بالمياه المحملة بغاز ثنائي أوكسيد الكربون. ويقدر ما يتشظى الصخر بالتجوية الفيزيائية تصعب عمليات الانحلال بالحموض أكثر أهمية.

تتغلغل مياه الأمطار والمياه الجوفية الحمضية في الشقوق والفواصل بين الطبقات، وتؤدي إلى تآكله تدريجياً وانتزاع أيونات الكالسيوم والمغنيزيوم منه على شكل محاليل. فإذا كان الصخر الكلسي يحتوي على شوائب حديدية فإنها تلون الشقوق باللون الصدئي. أما إذا كانت الشوائب مؤلفة من حبات الكوارتز والغضار فإنها تتراكم على شكل متبقيات، ولا تلبث أن تغسل وتزول بالمياه. أما إذا كان الصخر الكلسي نقياً أو دولوميتياً فإنه يزول كلياً بالانحلال دون أن يخلف وراءه بقايا من الرمال أو الغضار.

## تركيز الفلزات الثابتة Concentration of stable minerals

ليس فلز الكوارتز الفلز الوحيد الذي يقاوم عمليات التجوية الكيميائية، وإنما توجد فلزات أخرى تبقى ثابتة نسبياً على سطح الأرض، مثل فلزات الماس Diamond والبلاتين Platinum والذهب Gold حيث توجد في الريغوليت regolith الجوى.

تحرر التجوية هذه الفلزات من الصخور والعروق المحتوية عليها، وتنقل بواسطة المياه، ولا يلبث بعضها أن يترسب في قاع المجاري المائية، لكثافته العالية، على شكل توضعات مكيشة placer deposits. ويمكن أن تكون هذه التوضعات بتراكيز كافية تجعلها ذات قيمة اقتصادية عالية.

### لحاء التجوية Weathering rind

إذا كسرنا حصة بازلتية كبيرة cobble فسوف نلاحظ وجود قشرة أو لحاء خارجية فاسدة تحيط بلب داخلي غير متأثر (شكل ١٠-١). وإن الفحص المجهرى لهذه القشرة يبين أنها مؤلفة من بقايا التجوية الكيميائية. وتتشكل هذه القشرة في جميع أنواع الصخور حتى في الصخور الأكثر ثباتاً من الناحية الكيميائية كالكوارتزيت والأوبسيدان Obsidian. وتزداد سماكة هذه القشرة تدريجياً مع تقدم التجوية الكيميائية في الصخر. ونتيجة لذلك فقد وجد الجيولوجيون أن هذه القشرة تفيد في تقدير العمر النسبي للرسوبات التي تحتوي على نماذج منها. وقد أعتد عليها في تأريخ الأدوات الحجرية القديمة.

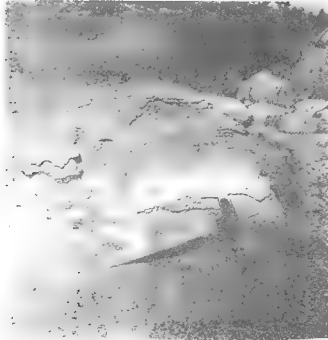


شكل (١٠-١): يوضح لحاء التجوية في حصة بازلتية بمسلكة حوالي ٢ مم.

## التقشر والتجوية الكروانية Exfoliation and spheroidal weathering

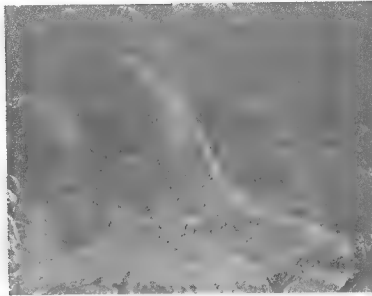
عملية التقشر هي انفصال قشور صخرية رقيقة متتابعة عن نواة صخرية غير مجوأة، تسببها القوى الفيزيائية أو الكيميائية التي تعطي جهوداً تفاضلية differential stresses ضمن الصخر.

إن تحول الفلزات السيليكاتية في الصخور النارية إلى فلزات غضارية بالتجوية الكيميائية يرافقه زيادة في الحجم، نتيجة إضافة الماء في البناء البلوري، فهذه الزيادة في كتلة القسم السطحي تضغط بقوة نحو الخارج مما يؤدي إلى انفصال قشرة عن الجسم الأصلي للصخر. وان انفصال القشرة الخارجية يعطي فرصة للتجوية الكيميائية للتغلغل لعمق أكبر، وهكذا تستمر عملية التقشر (شكل ١-١١). وتتم هذه العملية سواء على سطح الأرض أو تحت السطح، ويمكن ملاحظتها غالباً عند شق الطرقات. وهي كذلك ليست مقتصرة على مناخ معين، مع أن تأثيرها يظهر بوضوح في المناخ الجاف، حيث تغطي الجلاميد boulders شبه الكروية والمتقشرة سطح الأرض.



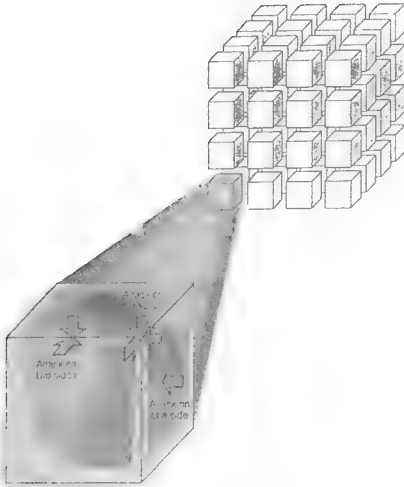
شكل (١١-١): يوضح عملية التقشر في جلود غرانيتي

تكون غالباً الأشكال شبه الكروية والمتقشرة التي تشكلت بفعل التجوية الكيميائية متوضعة في صفوف تتجه باتجاهات مختلفة، ذلك لأن تشكيلها مرتبط بوجود الشقوق والفواصل في الصخور النارية، التي تُقسم الصخر إلى كتل صغيرة متجاورة، مما يساعد على تسرب المياه المحملة بثنائي أكسيد الكربون خلالها. ويتم تأثيرها في كل كتلة من كتل الصخر المتشق على حدة، مما يؤدي في النهاية إلى تفككها إلى أشكال شبه كروية (شكل ١٢-١).



شكل (١٢-١): التجوية الكروانية لصخور غرانيتية كثيفة الفواصل.

يعزى اتخاذ كتل الصخر المتشققة ذلك المظهر شبه الكروي إلى أن زوايا كتلة الصخر غالباً ما تكون أكثر تعرضاً للتجوية الكيميائية، لأن نسبة مساحتها السطحية إلى حجمها كبيرة إذا ما قيس بالحواف والأسطح (شكل ١٣-١) ولذا تتعرض هذه الزوايا للتحلل السريع، وتتحوّل كتلة الصخر إلى كتل ذات شكل كُرَواني spheroid وعليه فإنها تسمى التجوية الكُرَوانية.



شكل (١٣-١): يوضح أن الزوايا أكثر عرضة للتأثر الكيميائي من الجوانب والأوجه.

### العوامل المؤثرة في التجوية **Factros influence weathering**

يتأثر نوع تجوية الصخور ومعدلها بعدة عوامل أهمها: التركيب الصخري والمناخ والوضعية الطبوغرافية والزمن.

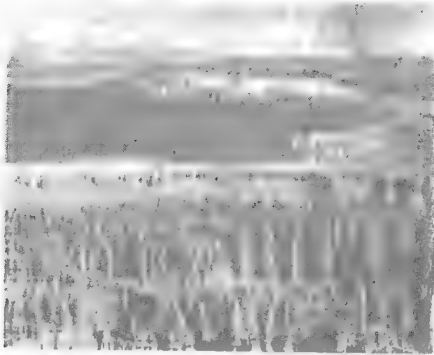
١- التركيب الصخري والبنية الصخرية: رأينا سابقاً أن الفلزات تتأثر بشكل متباين بالتجوية، فمن الطبيعي أن تتأثر الصخور تأثراً متبايناً. فالكوارتز يكون

شديد المقاومة للفساد الكيميائي وبالتالي تكون الصخور الحاوية نسبة عالية من هذا الغاز مقاومة أيضاً. لذلك تظهر الهضاب والجبال المولفة من صخور غرانيتية أو كوارتزيتية بارزة بشكل واضح عن الأراضي التي تحيط بها والمولفة من صخور ذات مقاومة أقل وتحوي نسبة قليلة من الكوارتز.

يؤثر أيضاً النسيج الصخري والبنية في معدل تجوية الصخور إضافة إلى تركيبها الفلزّي، فالصخور الغرانيتية والكوارتزيتية، تتحطم بشكل سريع بالتجلد إذا كانت تحتوي على الكثير من الشقوق والفواصل. وبصورة عامة تتجوى الصخور الرسوبية والاستحالية بسرعة أكبر من الصخور النارية لوجود سطوح التطبيق والصفوفاة.

إن التنوع التضاريسي الذي يظهر في الطبيعة ما هو إلا نتاج التجوية المتباينة differential weathering، التي تحدث بمعدلات مختلفة نتيجة تباين الصخور في التركيب والبنية وبالتالي في مقاومتها للتجوية (شكل ١-١٤). ففي تشابع صخري مؤلف من الغضار الصفحي والحجر الرملي، يُظهر الغضار الصفحي تجاوباً أكثر للتجوية مما يؤدي إلى ظهور الحجر الرملي على شكل تضاريس حادة. وحين تكون الطبقات أفقية تصبح التضاريس متدرجة، بحيث تكون طبقات الحجر الرملي على شكل حروف بارزة بين منحدرات خفيفة من الغضار الصفحي. وحين يكون التطبيق مائلاً يبرز الحجر الرملي على شكل أعراف تفصل بينها وهاد منخفضة في الغضار الصفحي.

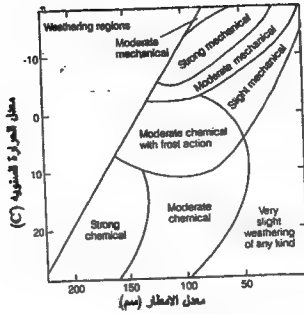
إن مثل هذه الظواهر الطبوغرافية تساعد الجيولوجي في الحقل على توقع أماكن الصخور المختلفة على الخرائط حسب توزع أنواعها، وبخاصة حين لا تكون التكتشفات واضحة للعيان.



شكل (١٤-١): يوضح التضاريس الثلجية من التجوية المتأخرة في الصخور غير المتجانسة.

٢- المناخ: يقصد بالمناخ كمية الأمطار ودرجة الحرارة والرياح. وتتحكم هذه العوامل المناخية في معدل التجوية. كما تحدد بطريقة غير مباشرة نوع الغطاء النباتي وكميته. وعادة تكون المناطق ذات الغطاء النباتي الكثيف لها تربة سمكية غنية بالمواد العضوية المتحللة، التي تشتق منها المحاليل الكيميائية النشطة مثل حمض الكربون *Carbonic acid* والحموض الدبالية *humic acids*.

وهكذا فإن الرطوبة وارتفاع الحرارة تزيدان من وطأة الفعل الكيميائي، لذلك لا يكون من المستغرب أن تكون التجوية الكيميائية أكثر تعمقاً في الصخور الواقعة في المناخ الدافئ والرطب، بالمقارنة مع صخور المناخ البارد والجاف (شكل ١٥-١).



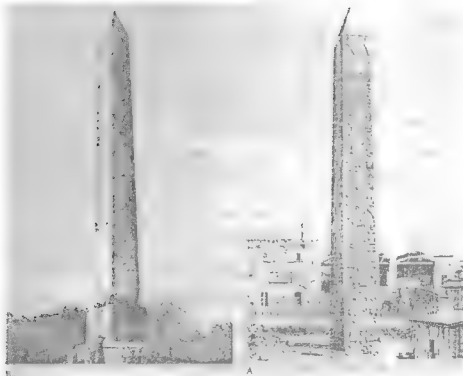
شكل (١٥.١): يوضح تأثير المناخ في معدلات التجوية.

كذلك فإن المناخ يؤثر في الطبوغرافية الناتجة من التجوية. فصخور الحجر الكلسي والرخام المولدة بمعظمها من فلز الكالسيت القابل للانحلال، تكون حساسة جداً للتجوية في المناخ الرطب، ويظهر ذلك في مناظرها الطبيعية. وتظهر هذه الصخور على شكل حروف بارزة وحادة في المناطق الجافة، لأن معدل الأمطار يكون ضعيفاً والحياة النباتية فيها تتوزع على شكل بقع صغيرة. ففي مثل هذه الشروط يكون تأثير الفعل الميكانيكي للتجوية قوياً وتأثيره واضحاً.

ومن الأمثلة النموذجية التي تبين أثر المناخ في معدل التجوية الكيميائية نذكر مسلة كليوباترة Cleopatra's Needle الغرانية التي صمدت ألوف السنين في مناخ مصر الجاف، وبقيت محفظة بكتابتها المهرغولية قرابة ٤٠٠ سنة، لكنها تأثرت بالتجوية بعد نقلها إلى حديقة سنترال بارك Central Park في نيويورك منذ ١٠٠ سنة، بسبب تعرضها لجو المدينة الرطب، وأزيلت كتابتها المهرغولية من الجانبين المواجهين للرياح، خلال أقل من ٧٥ سنة (شكل ١٦-١). فمناخ نيويورك الرطب هو المسؤول عن زيادة عمل التجوية، بالإضافة إلى الجو الملوث لهذه المدينة



الذي يحوي حمض الكبريت، وغيرها من الملوثات التي لم تتعرض لها هذه المسلة في أجواء مصر القديمة.



شكل (١٦-١): تأثير التجوية الكيميائية في مسلة كلوبيتره الفرانكتية.

A - المسلة قبل نقلها من مصر. B - بعد نقل المسلة إلى الحديقة المركزية في نيويورك. ويلاحظ اختفاء سطوحها الخارجية وبخاصة السطح المواجه للرياح الذي طمست كتاباته الهيروغليفية بعد مرور (٧٥) عاماً.

٣- التضاريس والطبيعة الطبوغرافية: إن وضع التضاريس يمكن أن يتحكم بشكل غير مباشر في كمية الأمطار وفي نوعية الغطاء النباتي وكثافته، كما أن طبيعة الانحدار لها تأثير في معدل التجوية. وحين تكون الصخور المحواة على منحدر شديد، فإن مياه الأمطار تغسل المنتجات الصلبة إلى أسفل المنحدر، وبالتالي تفسح المجال ثانية لتعرض السطوح الصخرية للتجوية. وبذلك تكون سماكة غطاء الأنقاض الناجم من التجوية قليلة. أما في المنحدرات اللطيفة فتبقى منتجات التجوية في أماكنها، ويتراكم بعضها فوق بعض حتى إنها قد تصل أحياناً إلى سماكة (٥٠) متراً أو أكثر.

٤- الزمن: دلت الدراسات التي أجريت على صخور الأبنية والتماثيل القديمة، أن الصخور الصلبة تحتاج إلى مئات وألوف السنين حتى تؤثر فيها التجوية لعق بضعة ميلمترات. فقد لوحظ أن صخور الغرانيت وغيرها من الصخور القاسية في نيو إنجلاند New England واسكتلندا ورجال الألب ما زالت مصقولة وتظهر فيها أعداد محدودة من الحت الجليدي، الذي يعود تاريخها إلى أواخر العصر الجليدي. وتحتاج هذه الصخور في مثل هذه الشروط المناخية إلى عشرات الألوف من السنين حتى تظهر فيها آثار التجوية. وعلى كل حال فالمناطق التي تتعرض فيها الصخور إلى عمليات التجوية لملايين السنين فإن تأثيراتها تعمق كثيراً. وقد دلت عمليات الحفر المنجمي في بعض المناطق المدارية على وصول تأثيرات التجوية في الصخور إلى أعماق قد تصل إلى (١٠٠) متر أو أكثر.

لقد تم التعرف على معدلات تجوية الصخور بطرائق عديدة: أولاً بوساطة الدراسات التجريبية التي صممت تجاربها بحيث يتم التحكم بالزمن عن طريق تسريع الفعل الكيميائي برفع درجة الحرارة وزيادة الماء اللازم وتصغير حجم الحبات. ثانياً ملاحظة عينات صخرية يعرف تاريخها. وثالثاً بوساطة دراسات التاريخ بالنظائر المشعة لرسوبات أو صخور تعرضت للتجوية خلال ألوف أو ملايين السنين. وقد توصلت جميع الدراسات السابقة إلى أن المعدلات الوسطية للتجوية تتناقص مع الزمن. إذ إن التفتحات الناجمة من تجوية البازلت مثلاً تكون ناتجة تجاه المؤثرات الكيميائية للتجوية، كما أن إزالتها من فوق صخورها تتضاؤل تدريجياً، وكلما زاد بنيتها أكثر كلما تناقص معدل التجوية. وعلى كل يحتاج ذلك إلى زمن طويل، ربما نصف مليون سنة أو أكثر، قبل أن يبدأ معدلها بالتناقص إلى حد يصل فيه إلى درجة من الثبات.

## التربة وتشكلها

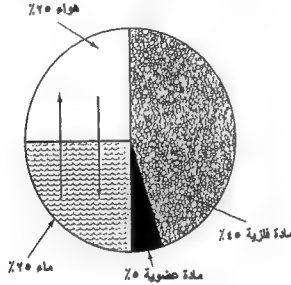
التربة soil لها أهمية اقتصادية كبيرة، ويمكن أن يقال عنها انها الجسر بين الحياة وعالم الجماد inanimate world. وتعرف التربة بأنها الوسط الطبيعي التي تنمو فيها النباتات. وتتميز بظهورها على هيئة طبقات تسير موازية لسطح الأرض، وتتألف من الشظايا الصخرية الجوية والحبات الفلزية إضافة إلى الرطوبة والغازات. ويدعى علم التربة بالبيدولوجيا Pedology. وهو من الفروع الحديثة للعلوم، وعلم أساسي في الزراعة، كما أن علاقته مع الهندسة وإدارة استخدام الأراضي تتوثق أكثر فأكثر.

يستخدم اصطلاح الريغوليت regolith لحمل الغطاء الفتاتي الواقع فوق المهد الصخري. ويمكن أن يتألف من البقايا الناجمة من تجوية الصخور المحلية، أو أنه قد يكون منقولاً بالرياح، أو بالمياه أو بفعل عوامل أخرى، ولهذا يكون الريغوليت متبقياً residual أو منقولاً transported.

### تركيب التربة composition of soil

تتألف التربة من شظايا الصخور والغازات التي تشكلت بالتجوية. أما الفلزات فهي بالدرجة الأولى من الغضاربات والكوارتز مع كميات أقل من أكاسيد الحديد والألنيوم. وعادة تحوي التربة الناجمة من تجوية غير كاملة بالإضافة إليها، عدداً من الفلزات الأخرى. أما المكونات الأخرى للتربة فهي الغازات والمواد العضوية والماء. أما الغازات فهي الموجودة في الغلاف الجوي بالإضافة إلى الغازات الناجمة من النشاط العضوي المحلي. وأما المواد العضوية فتتكون من جذور النباتات وغيرها من الأجزاء النباتية الحية مع ما يتبقى من تفسخ المواد العضوية. وبالرغم من أن نسب

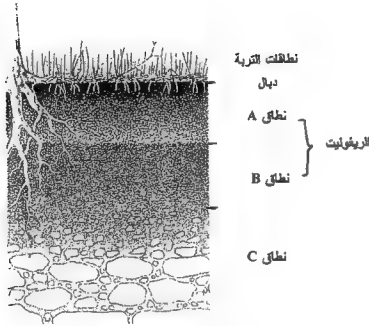
هذه المواد قد تختلف، إلا أن المكونات الأساسية للتربة تبقى ثابتة (شكل ١٧-١). ويتكون نحو نصف الحجم الكلي لتربة سطحية جيدة من خليط من مواد صخرية مفتتة ومتحللة ومواد عضوية، أما النصف الباقي فيشغله فراغات يتخللها الهواء والماء.



شكل (١٧.١): التركيب الحجمي للتربة ذات شروط جيدة لنمو للنباتات.

## مقطع التربة

حين نلاحظ التربة على طرف حفر أو على جدار بخندق حديث الحفر يمكن تمييز طبقاتها. تتألف التربة عادة من طبقتين أو ثلاث طبقات وأحياناً أكثر. ومع استمرار عمليات التجوية أثناء تشكل التربة، فإن ذلك يؤدي إلى تشكل الطبقات فيها. وعندما تكون التربة بلون طبقات مميزة، أو ذات تطبيق قليل للوضوح فإنه يقال عنها إنها تربة غير ناضجة immature soil، بينما تكون التربة ذات الطبقات واضحة المعالم تربة ناضجة mature soil. وتدعى طبقات التربة المميزة عن بعضها البعض بالنطاقات zones، ولكل نطاق مجموعة من الخصائص المميزة، أما مقطع التربة فيشمل مجموعة النطاقات من السطح حتى المهدي الصخري (شكل ١٨-١).



شكل (١٨٠١): مقطع في تربة ناضجة يوضح النطاقات الثلاثة.

تعرف الطبقة العليا من قبل العاملين في دراسة التربة بالنطاق A، كما تدعى بالتربة العليا top soil أو التربة السطحية surface soil. وقد يكون الجزء الأعلى منه غنياً بالمادة العضوية ويدعى الدبال Humus، الذي يجعل التربة خفيفة الوزن وجيدة التهوية ويخدم كمصدر للنيتروجين الضروري للحياة النباتية. ويظهر النطاق A واضحاً بسبب الغسل المستمر بالمياه السطحية التي تحل كثيراً من موارده الكيميائية. وتنتج النباتات التي تعيش فيه، ثنائي أو كسيد الكربون الذي يشكل مع الماء حمض الكربون، كما تتشكل حموض عضوية في الدبال. وتتفاعل هذه المواد الحمضية مع التربة مودية إلى تحرر كثير من المواد المغذية للنباتات. إلا أن حركة المياه قد تغسل معظم هذه المواد من هذا النطاق وتحملها باتجاه الأسفل، مما يفقره

بالمواد الضرورية للنباتات. وعندما تغسل أكاسيد الحديد من التربة العليا فإن لويسيت يصبح فاتحاً. ولكن يبقى الجزء العلوي منها قائم اللون لاحتوائه على الديال.

يقع تحت التربة السطحية مباشرة النطاق B وكثيراً ما يعرف هذا النطاق "تربة السفلى subsoil"، وتحتوي على المواد والمعادن والفلزات التي غسلت من النطاق A، وقد تراكمت فيها فلزات الغضار وأكاسيد الحديد وغيرها من المواد. وبسبب وجود الغضار فيها على تماسكها، وتصبح أكثر صلابة بوجود أكاسيد الحديد. كما تقل نفوذيتها، لذلك يكون غزو الجذور فيها أكثر صعوبة. ويشكل النطاقان معاً ما يدعى السولوم Solum أو التربة الحقيقية true soil. وفي السولوم تنشيط عمليات تكوّن التربة، ويحصر فيه بشكل كبير وجود الجذور الحية ونشاطات النباتات والحيوانات الأخرى.

وقد توجد تحت النطاق B طبقة من المواد المفككة والمكسرة المشتقة من الصخر الأم وتشكل النطاق C. وحين غيابه فإنه يحتمل وجود صخر مهد غير مجوى ويدعى في هذه الحالة النطاق R.

وهنا تجدر الإشارة إلى أنه لا يوجد في حالات كثيرة خطوط حادة فاصلة بين طبقات التربة المختلفة، إذ يتدرج التغير من طبقة لأخرى. بالإضافة إلى ذلك فإن هناك تربة تفتقد وجود النطاقات كلياً وهي تربة غير ناضجة وتوجد في السفوح شديدة الانحدار.

### العوامل المتحكمة في تشكل التربة Factors control the soil formation

تمثل التربة النواتج النهائية لتضافر عدة عوامل منها جيولوجية ومناخية وعضوية وطبوغرافية عملت خلال فترات زمنية متفاوتة. وإن هذه العوامل يعتمد بعضها على بعض إلا أنه من المفيد أن ندرس دور كل منها على حدة.

١- العامل الجيولوجي: كان العلماء يعتقدون بأن تركيب المهده الصخري bedrock<sup>(١)</sup> هو العامل الأساسي في تكوين التربة، ومن هنا جاء تقسيم التربة إلى مجموعتين:

أ- التربة المتبقية **residual soil**: وهي التي اشتقت من الصخور الموجودة تحتها ويلاحظ فيها انتقال تدريجي إلى ما تحت التربة ومنها إلى الصخر الأم. نذكر منها التربة الكلسية **Limestone soil** والتربة الرملية **Sandstone soil** والتربة البازلتية والغرانيتية... الخ.

ب- التربة المنقولة **transported soil**: وهي تربة نقلت من أماكن تشكلها إلى أماكن أخرى. وقد يتألف بعضها من مواد غير متأثرة بعمليات التجوية الكيميائية. ويرجع وجودها في مكانها إلى عوامل النقل المختلفة مثل الرياح والأمطار والأنهار والجليديات. ويراوح حجم جزيئاتها من حبيبات ناعمة جداً إلى حصى كبيرة بالإضافة إلى الاختلاف في تركيبها الكيميائي، نذكر منها التربة اللحية **alluvial soil** والتربة الجليدية **glacial soil** والتربة الهوائية **eolian soil** والتربة البحرية **lacustrine soil** والتربة البحرية **marine soil**. وتمتاز التربة الجليدية بمخصوبتها، لأنها تمثل صخوراً مطحونة احتفظت بجميع عناصرها.

ولكن فيما بعد اتضح لعلماء التربة بأن هناك عوامل أخرى أكثر أهمية من العامل الجيولوجي وبخاصة المناخ. وفي الحقيقة فقد وجد أن أنواعاً متشابهة من التربة تنتج غالباً من صخور أمهات مختلفة. وإن أنواعاً مختلفة من التربة تنتج من صخور متماثلة.

٢- عامل المناخ: يعد المناخ من أهم العوامل المتحكم في تشكيل التربة، حتى إننا نستطيع أن ننسب تربة معينة إلى مناخ معين. ويكون تأثير هذا العامل بشكل مباشر من حيث الحرارة وهطول الأمطار. فمثلاً يمكن أن ينتج المناخ الرطب والحار طبقة سمكية من التربة المجهزة، في الفترة الزمنية نفسها، التي ينتج فيها المناخ البارد والأقل رطوبة طبقة رقيقة من الفتات الصخري الجوى ميكانيكياً. بالإضافة إلى ذلك فإن

(١) يعرف أحياناً بالمهد الصخري بالصخر الأم **parent rock**.

المعدل العالي من الأمطار يغسل المواد الفلزية من الطبقة السطحية وتُفقد التربة من المواد المخصصة. وبالمقابل فإن المعدل المطري المنخفض قد يؤدي إلى تبخر المياه من الطبقة السطحية أو تشكل قشرة سطحية تتيح الجفاف. وفي النهاية فإن المناخ يتحكم في نوع الحياة النباتية والحيوانية السائدة في التربة وفي تشكل الدبال.

**٣- عامل الزمن:** وهو العامل المهم في تحديد سماكة التربة ودرجة نضوجها. فالترية الناضجة تظهر مستوياتها تامة التكوين، وهذا دليل على أن العوامل المختلفة التي كونتها قد تضافرت لفترة زمنية كافية. بينما يكون العكس في التربة غير الناضجة. ولكن ما هو الوقت اللازم لتشكيل التربة؟ يمكن أن تتطور التربة بشكل كامل، في المناطق المعتدلة، خلال بضع مئات أو بضعة آلاف من السنين. أما في المناخ البارد، حيث تكون التحوية بطيئة، فإن تشكل التربة يكون شبه معلوم. ويمكننا أن نلاحظ في بعض المناطق أن الصخور بقيت غير مجعوة بشكل ملحوظ مدة ١٠,٠٠٠ أو ٢٠,٠٠٠ سنة خلال العصر الجليدي. وبالمقابل يمكن أن تتشكل تربة بسماكة متر خلال قرن واحد على سطح صخور بركانية، في مناطق مدارية، مثل جزر الهاواي، وهذا التطور السريع للتربة أمر غير عادي بالمقارنة مع تطور التربة في أنحاء العالم.

**٤- العامل العضوي:** يعتقد كثير من علماء التربة أن عمليات تكوين التربة لا تبدأ إلا عندما تتداخل العوامل الحياتية في التفاعل بين المهد الصخري وبيئته. إن المصدر الأساسي للمواد العضوية هو النباتات مع بعض المساهمة من الحيوانات والكائنات المجهرية. فالنباتات تؤثر في تفتيت التربة وتحللها، كما أن نشاط البكتيريا والفطريات يساعد على تحلل بقايا النباتات والحيوانات لتعطي الدبال وينتج منها عدة حموض عضوية تنشط عمليات التحوية. وكذلك تعمل الديدان الأرضية والنمل على قلب التربة وحفرها، مما يسهل مرور الماء والهواء خلالها. يضاف إلى ذلك أن بعض الكائنات المجهرية تساعد على تثبيت النيتروجين الجوي في التربة. إن جميع هذه العضويات تعمل على إخصاب التربة والحصول على تربة ناضجة، إذا كانت العوامل الأخرى مناسبة.

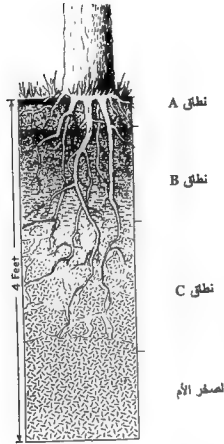


٥- العامل الطبوغرافي: تؤثر الطبوغرافيا بشكل واضح في خواص مقطع التربة. إذ إن الانحدار سطح الأرض يتحكم بجريان المياه وتعرية المواد الناجمة من التجوية. لأن زيادة المواد المفككة يسهل أكثر كلما كان الانحدار شديداً، وبذلك يعمق تراكم مواد التربة ويوقف تطورها. أما في الانحدار الخفيف فإن المواد المفككة تبقى في أماكنها مما يساعد على عملية نضج التربة. وتساعد الأماكن المستقيمة المنخفضة، التي تقتصر للبحريان، على تطور الترب المستقيمة bog soils التي تكون غنية بالمواد العضوية ومشبعة بالمياه. إن الطبوغرافيا المثلى لتكون تربة ناضجة هو سطح مرتفع مستو أو متموج، حيث يكون الصرف جيداً إلى جانب الحسد الأدنى من التعرية، وتسرب كمية مناسبة من المياه إلى التربة.

إن عملية تكون التربة عملية معقدة تتضمن فيها وتداخل عوامل مناخية وعضوية وجيولوجية لفترات زمنية طويلة لتنتج تربة ناضجة. ولا نستطيع أن ننسب نوعاً معيناً من التربة إلى عامل واحد.

### نماذج التربة soil types

١- تربة البيدالفر Pedalfer soil: أتت هذه التسمية من الكلمة اليونانية pedon وتعني تربة، والرموز الكيميائية Al و Fe تمثل الحديد والألومنيوم. وتعرف أيضاً بالتربة الحديدية الألومينية (شكل ١- ١٩).

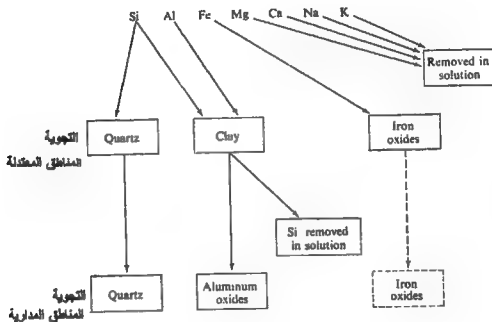


شكل (١٩٠١): تربة البيد للفير التي تطورت فوق صخور غرانيتية.

تتكون هذه التربة في غابات المناطق المعتدلة فوق صخور أمهات سيليسية الومينية (مثل الغرانيت). حيث تؤدي الأمطار إلى وجود غطاء نباتي كثيف وتشكل الدبال بنسبة عالية. فمياه الأمطار تصبح حامضية جداً بتفاعلها مع الدبال، وتنقل المواد قليلة الانحلال (الغضاريات وأكاسيد الحديد وأكاسيد الألمنيوم) من النطاق A إلى النطاق B وتعطيه اللون البني المحمر. أما الكربونات المنحلة فتتغسل من النطاق السطحي وتحمله المياه الجوفية. ويصبح هذا النطاق مؤلفاً من حبات كوارتز مفسولة.

٢- تربة اللاتيريت laterite soil: تتشكل هذه التربة في غابات المناطق المدارية فوق صخور أمهات سيليسية الومينية (نارية غنية بالصفاح). تتكون هذه التربة من

طبقة رقيقة من المواد العضوية، تليها طبقة أخرى قد تم غسلها من جميع المواد السيليكاتية بواسطة الأمطار الغزيرة، يميل لونها إلى الأحمر، وتمتد إلى أعماق بعيدة، ويصعب في هذا النوع من التربة تمييز الطبقات الثلاثة (شكل ٢٠١).



شكل (٢٠١): تلخيص مبسط للتجوية. يوضح تشكّل اللاتيريت.

يبدو أن عملية الغسل هي المسيطرة بسبب الأمطار الموسمية الغزيرة. وتغسل المياه كل شيء بما فيها السيليكا والغضار، وتحملها بعيداً، ما عدا الحديد والألمنيوم اللذين يشكلان أكاسيد مائية. ومن الواضح أن البكتيريا تحفر الدبال في درجات الحرارة العالية، ومن ثم فالياه لا تكون حامضية ولا تستطيع إزالة أكاسيد الحديد والألمنيوم<sup>(١)</sup>. ثم إن هبوط المياه في باطن التربة وحملها للذرات الغضارية وتوضعها

(١) - يسمى الخليط من أكسيد الحديد المائي  $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$  وأكسيد الألمنيوم المائي  $Al_2O_3 \cdot nH_2O$

البوكسيت Bauxite.

في الطبقة السفلية على شكل طبقة غضارية صماء مما يعيق نمو الجنذور. تُعرف التربة التي تشكلت في هذه الشروط باللاتيريت<sup>(١)</sup>.

يكون اللاتيريت أحمر اللون، قليل الخصوبة، وحين يقطع أو يوضع في قوالب ويجف تحت الشمس ثم يشوى يعطي القرميد (الأجر). ويمكن أن يستفاد من اللاتيريت في استخلاص الحديد والألمنيوم.

٣- تربة التشيرنوزوم Chernozom: توجد هذه التربة في السهوب الروسية وتشكل في ظروف مناخية خاصة، أهمها موسمية الأمطار، حيث تموت الأعشاب في فصل الجفاف وتبدأ بالتحلل، وبخاصة أن فصل الجفاف هو فصل برودة، كما أن الأمطار لا تكون غزيرة بشكل كاف لغسل المواد العضوية والمعدنية منها. لذلك تمتاز هذه التربة بخصبها وبغناها بكل العناصر الضرورية لنمو النباتات. ولا يظهر في مقطع هذه التربة سوى النطاق (A) ويمتاز بتراكم مواد عضوية وتحللها إلى درجة كبيرة، ويكون بلون أسود لذلك أطلق عليها التربة السوداء.

٤- تربة الصحارى: من أهم خصائص هذه التربة تشكل قشرات قد تكون كلسية أو سيليسية أو ملحية، أو قشرات صحراوية تكون بنية اللون أو سوداء مؤلفة من أكاسيد الحديد والمغنيزيوم. تتشكل هذه القشرات نتيجة لصعود المياه التي تحتويها التربة بفعل الخاصية الشعرية إلى الطبقات السطحية، فتتبخر المياه وترسب الأملاح على شكل قشور.

٥- التربة القديمة paleosoils وتسمى أحياناً التربة للمستحاثات fossil soils. إن دراسة التربة القديمة لها أهمية كبرى في معرفة الأحوال المناخية والطبوغرافية القديمة التي تشكلت فيها. فهي تساعد على إعادة بناء التاريخ الجيولوجي للأرض. ومن أمثلتها: التربة التي تشكلت عقب العصر الجليدي، ثم حفظت بطمرها برواسب رملية أو نهريّة.

---

(١) - أتت هذه التسمية من اللاتينية ويعني القرميد، لونها الأحمر البني يشبه اللون القرميدي.

## الفصل الثاني

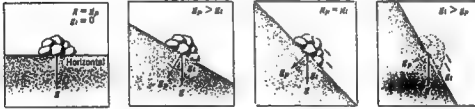
### تبدد الكتل

تعتمد التحويلة واحدة من صليقي الوصل الرئيستين ما بين الصغور الأصلية والرسوبات المشتقة منها. أما الصلة الثانية فهي تبدد الكتل *mass wasting*، التي تحرك نواتج التحويلة الصلبة (الريغوليت *regolith*) من الأعالي إلى أسفل المنحدرات بفعل الثقالة الأرضية *gravity*، دون تدخل الأوساط الناقلة المائية أو الهوائية أو الجليدية. ومع أن الثقالة هي القوة الفعالة المتحركة في عملية تبدد الكتل، غير أنه هناك عوامل أخرى، كالماء وزيادة الوزن والانحدار الشديد، تلعب دوراً هاماً في حركة الكتل. فالماء المتشرب في الريغوليت يملأ الفراغات المسامية ويقضي على تماسك جزيئاته، مما يسمح له بالانزلاق بسهولة كبيرة، وكذلك وجود الماء في الفتات الصخري والطين يؤدي إلى زيادة ملحوظة في الوزن لدرجة كافية لتسبب الانزلاق أو التدفق، ولهذا تنشط عمليات التبدد إثر هطول أمطار غزيرة لفترة طويلة. وبالحقيقة ليس من السهل أن نفصل بين التحويلة وتبدد الكتل أو عمليات الحث، لأنها تشكل مع بعضها بعضاً عمليات متصلة ومستمرة ومتداخلة في أفعالها المتبادلة. وهي جميعها تؤدي إلى تخريب الصخور الصلبة، وإعادة توزيع المواد الناتجة منها.

## الثقالة والمنحدر

قد يبدو لنا للوهلة الأولى حين نلاحظ منحدرًا تغطي سطحه النباتات، أنه قد وصل إلى درجة من الثبات حيث لا يظهر عليه دلائل النشاط الجيولوجي. ولكن عندما نفحص الانقراض الصخرية الواقعة تحت هذا الغطاء النباتي، نجد فيه كتلاً وقطعاً صخرية وحصى ورمالاً مشتقة من صخور المهد التي تتكشف في أعلى المنحدر. كما نلاحظ أنها قد ابتعدت متحركة نحو الأسفل بعيداً عن مصدرها. أما السبب الذي دفع هذه المواد للتحرك نحو أسفل المنحدر فهو الثقالة الأرضية، التي تشد الأجسام إلى سطح الأرض.

فإذا كان جسم معين يقع على سطح أفقي فإن الثقالة تثبته في مكانه. أما حين يقع على سطح مائل فإن قوة الثقالة تتحلل إلى قوتين أحدهما موازية للسطح ( $gt$ ) تشده نحو الأسفل، والثانية عمودية على السطح ( $gp$ ) تعمل على تثبيته كما في الشكل (١-٢).



شكل (١-٢): تآكل الثقالة الأرضية في الأجسام المتوضعة على منحدر ما.

عندما تغلب  $gt$  على  $gp$  يتحرك الجسم نحو الأسفل، وحينئذ نقول إن الانحدار تجاوز زاوية السكون<sup>(١)</sup> angle of repose، التي تتراوح بين (٢٥° - ٤٠°) درجة. وذلك بناءً على حجم وشكل الحبات. فكلما زاد حجم الحبات وكانت اشكالها زاوية

<sup>(١)</sup> الزاوية الأعظمية التي تبقى فيها الأجسام مستقرة على سطح مائل.

الأطراف زادت زاوية مكوناتها، بينما لا تستقر الحبيبات المدورة والناعمة على سطوح يزيد ميلها على (٣٠°) درجة.

حين توجد كتلة صخرية على قمة مرتفع أو جبل، فإن وصولها إلى هذا المكان نجم من تأثير قوة رافعة تغلبت على قوة الثقالة، لذلك يكون لهذه الكتلة الصخرية طاقة كامنة potential energy تُعرف بالطاقة المختزنة stored energy. وبهذا تكون الطاقة الكامنة (E) لكتلة صخرية (m) رفعت إلى الارتفاع (h) هي:

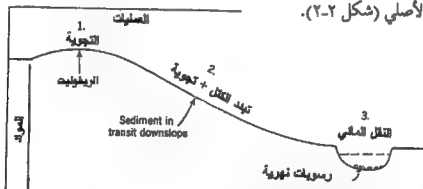
$$E = m.g.h$$

حيث تكون (g) التسارع الناجم من قوة الثقالة.

وهناك في الطبيعة أمثلة كثيرة مشابهة، فعندما ترتفع الرطوبة في أعالي الجو على شكل غيوم بتأثير الطاقة الشمسية تكتسب طاقة كامنة. وحين تساقطها على شكل أمطار تتحول إلى طاقة حركية kinetic energy (E). وهي الطاقة الناجمة من حركة الجسم. فالطاقة الحركية (E) الناجمة من هبوط كتلة صخرية (m) تتحرك بسرعة (v) هي:  $E = 1/2 m v^2$ . وبهذا نستطيع أن نقول إن تحرك الكتل الصخرية على سطوح المنحدرات نحو الأسفل ينجم من تحول الطاقة الكامنة إلى طاقة حركية.

حركة الانقراض الصخرية على المنحدرات

إن أي جسم يتحرر من صخور المهد بأفعال التجوية هو ناتج فتاتي أو ريغولي. وجميع المواد الفتاتية في الأماكن المرتفعة لها طاقة كامنة تدفعها للتحرك نحو الأسفل مبتعدة عن مصدرها. وقد تصل إلى أحد الأوساط الناقلة حيث تحملها إلى أماكن بعيدة جداً عن مكانها الأصلي (شكل ٢-٢).



شكل (٢-٢). علاقة تبيد الكتل بالتجوية من جهة النقل المائي من جهة ثنية.

يمكن أن نتصور أن أحداث تبدد الكتل كنظام مفتوح open system يتضمن إنتاج الكتل (ادخالاً) وتبديدها (إخراجاً). أما الإنتاج فهو المواد الصلبة الناتجة من التجوية. بينما يكون الإخراج هو تحركها على المنحدر باتجاه الأسفل، حيث يمكن أن تحمل بواسطة الأوساط الناقلة. وعندما يتعادل الإدخال والإخراج فإن نظام التبدد يكون نظاماً متوازناً، وفي هذه الحالة يكون للمنحدر ميل يسمح في أية نقطة منه بتحريك كمية من الفتات الصخري نحو الأسفل، وأن تضاف كمية معادلة لها.

لا يقتصر حدوث تبدد الكتل على اليابسة بل يحدث أيضاً تحت البحر، في الأماكن التي تراكم فيه الرسوبات على سطوح شديدة الانحدار كالمنحدر القاري، حيث يؤدي استمرار التراكم أو حدوث هزة أرضية إلى حالة عدم توازن فتتحدّر نحو الأعماق، لتفرض مساحات واسعة من قيعان البحار (الانزلاقات تحت البحرية). ولقد أظهر المسح الطبوغرافي تحت البحر وجود سطوح منحدره على امتداد حواف القارات وبعض الجزر التي تحدث فيها انزلاقات أرضية. وعلى هذا يمكن أن تجري عمليات تبدد الكتل في كل أنحاء العالم أينما وجد الفتات الصخري على سطوح منحدره.

### تصنيف عمليات تبدد الكتل:

تستعمل كلمة انزلاق الأرضي land slide، من قبل كثير من الناس والجيولوجيين، لوصف جميع أنواع التبدد المعروفة بما في ذلك تلك التي لا دور لحركة الانزلاق في حدوثها. وذلك للتعبير عن هذه العمليات وتبسيط كثير من الصفات المميزة، وأشكال اليابسة التي تدخل في حركات تبدد الكتل. وعلى الرغم من اختلاف عمليات تبدد الكتل في نواح معينة، إلا أنها تشترك في صفة واحدة وهي أنها تحدث فوق المنحدرات.

بالرغم من أن عمليات تبدد الكتل هي عمليات حركية معقدة، إلا أنه يمكن تصنيفها اعتماداً على نوع المواد ومخطط الحركة وسرعتها إلى: السقوط والانزلاق والميوط والتلغق، وهي عمليات سريعة الحركة، بالإضافة إلى العمليات شديدة البطء.



## ١- عمليات تدد الكتل سريعة الحركة

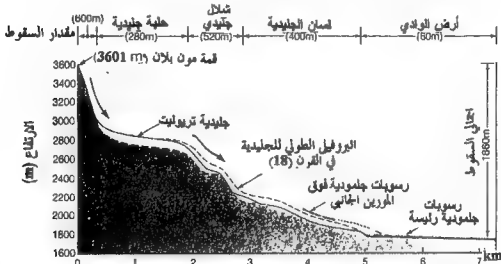
أ - سقوط الصخور والأنقاض الصخرية: هي سقوط قطع من الصخور المفككة، بصرف النظر عن حجم هذا القطع، سقوطاً حراً بعد انفصالها عن صخور المهد. وتحدث عادة في منحدرات شديدة الميل، كحافة جرف صخري أو قمة منحدر شديد. وتجري حوادثه على نطاق محدود بسبب تناوب التجمد والذوبان. وقد يقتصر السقوط على مفتتات وقطع صخرية، أو يشمل انهياراً مفاجئاً لكتلة صخرية ضخمة تتحطم حين تصطدم بالأرض ويتدحرج حطامها وينزلق ولا يوقفه إلا عامل الاحتكاك في أسفل المنحدر (شكل ٢-٣).



شكل (٢-٣): سقوط الصخور وسقوط الأنقاض.

يمكن أن نعرف عمليات السقوط بأنها عمليات مباغطة وسريعة لكتل صخرية تنفصل من صخور المهد بشكل فجائي هابطة نحو الأسفل. ويكون تأثير هذه الحوادث محدوداً إذا ما قورن بالتهور الصخري rock avalanches الذي يحدث عادة إثر انفصال كتل صخرية ضخمة تنهار من أعالي الجبال فوق الجليديات وتراكمات الثلوج، وتنزلق وتتدحرج جارفة معها كميات هائلة من الثلوج إلى مسافات بعيدة، وبسرعة كبيرة جداً مؤدية إلى أحداث كارثية على حياة الإنسان وممتلكاته ومنشآته في المناطق الجبلية.

ومثال ذلك ما حدث في المناطق المأهولة من جبال الألب. ففي شهر أيلول من عام ١٧١٧ انفصلت كتل صخرية ضخمة من قمة جبل مون بلان Mont Blanc الواقع على الحدود الفرنسية الإيطالية وسقطت فوق جليدية تريوليت Triolet Glacier. وقد تحركت هذه الكتلة الصخرية مع الجليد المنساق معها بسرعة كبيرة متجهة نحو أسفل الوادي، ودمرت في طريقها قريتين لتستقر على مسافة ٧ كم من الصخر المهدد التي انفصلت عنه. وكان هبوطها من ارتفاع ١٨٦٠ متراً (شكل ٢-٤).



شكل (٢-٤): مقطع طولاني يوضح مسار التيهور الصخري من قمة مون بلان إلى أسفل الوادي.

سقطت كتلة صخرية ضخمة من قمة مون بلان التي هي على ارتفاع ٣٦٠١ م إلى ارتفاع ٣٠٠٠ م، حيث اصطدمت بالجليدية تريوليت ثم تحركت بسرعة كبيرة على وسادة ثلجية هوائية إلى أسفل المنحدر. مما أدى إلى طمر قريتين مع جميع القاطنين فيها.

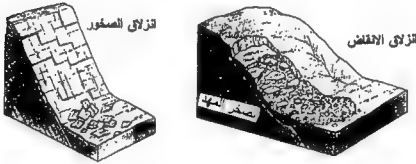
وقد قدرت السرعة التي وصلت إليها الكتلة الصخرية بـ ١٢٤ كم/سا والزمن الذي استغرقته في تحركها مسافة ٧ كم هو ما بين (٢-٤) دقائق.

ومن الصعب جداً ملاحظة التيهور الصخري حين حدوثه. ويفترض أن الحركة السريعة ناجمة عن تغليف الصخور المنهارة بالجليد المفكك والثلج، بالإضافة إلى الهواء المحجوز والمضغوط بينها وبين سطح المنحدر، الذي يقوم بدور وسادة هوائية، مما يجعل الصخور المنهارة قادرة على الحركة فوق سطح بهيئة ملاءة مرنة طافية،

مشابهة تماماً للوسادة الهوائية التي تتحرك فوقها مراكب الهوفر كرافت hovercraft.

ولم تكن هذه الكارثة الأولى والأخيرة فقد تحدث في كثير من المناطق الجبلية الجليدية بدون أية دلالات مسبقة، ولكن العلماء مهتمون بدراسة توزعها وأزمنة حدوثها ووضع المصورت اللازمة لتلافي الأخطار المحتملة.

ب - إنزلاق الصخور والأنقاض الصخرية: هي إنزلاق الصخور والمفتتات الصخرية غير المتماسكة والحماية على كميات قليلة من الماء على سطوح شديدة الانحدار بحيث تبقى ملاصقة للسطح أثناء حركتها (شكل ٥-٢) وقد يكون هذا السطح عبارة عن سطح تطبق أو فواصل وتشققات موازية لسطح المنحدر.

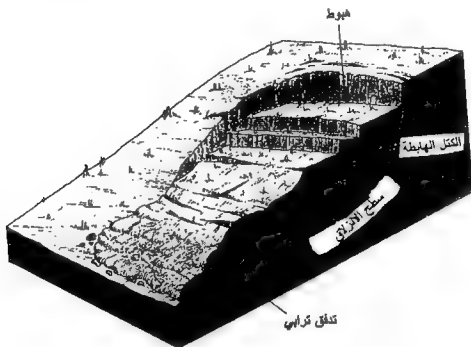


شكل (٥-٢): انزلاق الصخور والأنقاض الصخرية.

تجري عادة حوادث الانزلاق عندما تكون الطبقات مائلة، أو عند قطع قاعدة المنحدر، أو في حالة تشرب الطبقات السفلى للمياه الناتجة من هطول أمطار غزيرة أو من ذوبان الثلوج، مما يزيد من لزوجتها إلى درجة يقل فيها الاحتكاك، ولا تستطيع الكتلة الصخرية أو المفتتات البقاء في مكانها فتزلق على طول المنحدر.

ج - الهبوط Slump: وهو نوع خاص من عمليات الانزلاق. وتتميز بتحريك الكتل الصخرية والمواد غير المتماسكة كوحدة واحدة أو كوحدات على سطوح منحدره مقعرة هبوطاً انزلاقياً. ويرافق هذه الحركة حركة دورانية للكتلة المتحركة

حول محور أفقي موازٍ للحرف الذي انفصلت منه الكتلة الصخرية حيث لا تبعد الكتل المنزلقة كثيراً عن منشئها. وقد تكون الحركة سريعة ومفاجئة أو قد تحصل في فترات زمنية متباعدة (شكل ٦-٢).

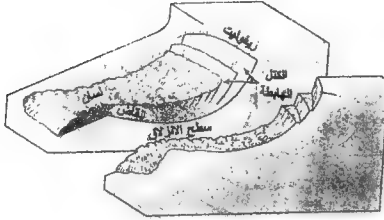


شكل (٦-٢): يحدث الهبوط بالزلاق الكتل على سطوح منحدره مقعرة.

تحدث عملية الهبوط في الأماكن المرتفعة التي تتألف من صخور متماسكة تقع فوق طبقات غضارية. فعند تشرب الصخور الغضارية بالماء تنتج وتشكل سطحاً انزلاقياً للطبقات المستندة إليها، وقد تحدث أيضاً في المنحدرات الشديدة حيث تستند فيها المواد في أعلى المنحدر إلى المواد في أسفله. فحين إزالتها تؤدي إلى حالة عدم استقرار للمواد في أعلى المنحدر وتجعلها تتحرك بفعل الثقالة الأرضية. عادة تتوافق عمليات الهبوط مع هطول أمطار غزيرة لفترة طويلة أو نتيجة هزة أرضية. كما يعتقد أنها تعود إلى عملية الحث السفلي للمنحدرات بواسطة الجاري المائية والأمواج. يضاف إلى ذلك أن نشاطات الإنسان في أعمال المقالع أو شق الطرقات وزيادة كثافة الأبنية أو المنشآت على جوانب هذه الطرقات قد تؤدي إلى أحداث مماثلة.

## د - التدفقات

د-١ - تدفق الأنقاض debris flow: وهي أشكال أخرى من انزلاقات الأراضي، التي تشمل تحرك كتل ضخمة من الريفوليت الصخري غير المتماسك للولف بأكثر من نصف مواده من حبات أخشن من الرمل. ففي بعض الحالات تكون التدفقات مرافقة لهبوط كبير وتمتد على شكل لسان عند قاعدة الكتلة الهابطة (شكل ٧-٢). وقد تحدث أحياناً فوق سفوح المنحدرات في المناطق الممطرة (شكل ٨-٢). وتتميز السطوح العلوية لهذه التدفقات بوعورتها حيث تظهر عليها أعراف ومنخفضات قوسية، تشبه في ذلك توضعات جليديات الجبال.



شكل (٧.٢): رسم نموذجي يوضح تدفق الأنقاض المترلق مع للهبوط.

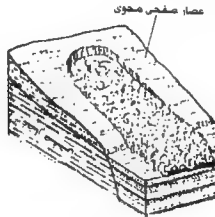
تختلف سرعة التدفقات من مكان لآخر حسب طبيعة الانحدار وشروط المناخ، فمن الممكن أن تكون بطيئة جداً لا تتجاوز متراً في السنة، كما يمكن أن تصل أحياناً إلى بضعة كيلومترات في الساعة.



## اعراف ومنخفضات قوسيه

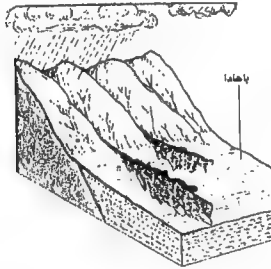
شكل (٨-٢): تدفق الانقراض فوق سطوح المنحدرات.

٢-٥ تدفق الزاب **earth flow**: وهي عمليات وسط بين تدفقات الانقراض وتدفقات الطين. وتحدث حين يكون الفتات الصخري مؤلفاً بمعظمه من مواد ناعمة بحيث تصبح أشد تشرباً للماء من مواد تدفقات الانقراض. والشروط اللازمة لحدوث هذه التدفقات أن تكون موادها غير متماسكة، وتقع على سطوح شديدة الانحدار، وهطول أمطار غزيرة. إن وجودها في حالة عدم توازن يجعلها تتدفق بسبب حدوث هزة أرضية، وعندها يقلل الماء المتشرب فيها من عامل الاحتكاك ويزيد من سيولتها. وعندما تتدفق تحمل معها ما هو موجود فوقها من جلاميد ونباتات وأبنية ومنشآت وغيرها (شكل ٩-٢).



شكل (٩-٢): تدفق ترابي.

٣-٥ تدفق الطين mud flow: وهي عمليات تؤدي إلى تدفق كميات هائلة من الفتات الصخري الناعم المؤلف بمعظمه من الغضاريات القابلة لتشرب نسبة عالية جداً من الماء. مما يجعلها شديدة السيولة وتتحرك على سطوح شديدة الانحدار صسن الأودية المنخفضة أو في الجاري المائية. ويختلف قوام مواد التدفقات الطينية من قوام العجين الاسمنتي قبل تصلبه إلى قوام الصابون السائل. وغالباً يترافق نشاط هذه التدفقات مع هطول أمطار غزيرة في الأماكن المنحدرة من الخوانق الجبلية. وهي تأخذ عادة شكل نهر من الطين المتدفق الذي يجرف في طريقه الرسوبات من جوانب الأودية وغيرها من المواد المفتتة بما فيها الجلاميد الصخرية. وينتشر التدفق الطيني عند وصوله إلى منطقة سهلية مفتوحة مشكلاً غطاءً مروحي الشكل من الرسوبات الطينية المختلطة مع الرمل والحصى والجلاميد (الياهواد) (شكل ١٠-٢).



شكل (١٠-٢): التدفقات الطينية وتشكل المراوح الحقيقية في أسفل المنحدرات.

إن لعمليات تدفقات الطين أخطاراً تدميرية شديدة بسبب كثافتها العالية التي تجعلها قادرة على جرف أو تدمير ما يصادف طريقها بما فيها الأبنية والمنشآت والسيارات وغيرها. فقد تقتلع الأبنية والجسور من أساساتها، كما يمكن أن تحمل

معها جلاميد صخرية ضخمة قد يزيد قطرها على عشرة أمتار، وتنتقلها إلى مسافات بعيدة عن أماكنها الأصلية.

تحدث التدفقات الطينية غالباً في المناطق الجافة ونصف الجافة، حيث تتوافر شروط الجفاف والمواد الناعمة غير المتماسكة، وانعدام الغطاء النباتي وأمطار فحائية غزيرة، حيث تؤدي إلى ظاهرات جيومورفولوجية مهمة في هذه المناطق، وقد تحدث التدفقات الطينية أيضاً في المناطق البركانية ذات البراكين الانفجارية، التي تطلق مواد ناعمة غزيرة تتراكم بسمكات كبيرة على سفوح البراكين، والأساكن الأخرى المجاورة، حيث يسهل المطر الغزير انزلاقها وتدفقها على المسطوح المنحدرة على شكل تدفقات يطلق عليها الأتلونيسيون اسم اللاهار Lahar. وغالباً ما تتحرك اللاهات بسرعة كبيرة وتقطع مسافات طويلة بعيدة عن البراكين، وقد تصل سرعتها إلى ١٠٠ كم/سا أو أكثر وتشكل أخطاراً مدمرة تترافق مع انفجارات البراكين. كما حدث في أضخم بركان في كولومبيا، حيث رافق الانفجار عام ١٩٨٥ تدفق طيني هائل اندفع بسرعة كبيرة على جوانب البركان وغمر مدينة أرميرو Armero وقتل أكثر من ٢٠,٠٠٠ نسمة.

## ٢- عمليات تدد الكتل شديدة البطء

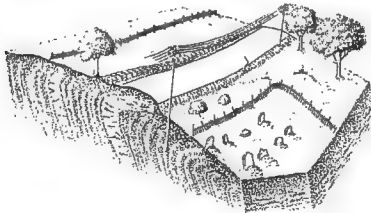
أ- الجمد السرمدي وتوج الرية: ينتشر الجمد السرمدي permafrost في مناطق قارة القطب الجنوبي ومناطق اليابسة المحيطة بالقطب الشمالي، حيث يكون معدل الحرارة السنوي لهذه المناطق دون الصفر، مما يؤدي إلى تجمع الرية في الشتاء إلى أعماق كبيرة تفوق العمق الذي يصل إليه الذوبان في الصيف. ويتج من ذلك وجود طبقة تحت سطحية دائمة التجلد تعرف بالجمد السرمدي، وهي تبطن ٢٠٪ من سطح اليابسة بالإضافة إلى مناطق القطبين.

توج الرية: يدعى التحرك اللزج والبطيء للرية والأنقاض السطحية المثقلة بالماء نحو أسفل المنحدرات بتموج الرية solifluction. تحدث هذه العملية



من نبد الكتل بخاصة في المناطق المبطنة بالجمد السرمدي. فعندما تذوب التربة السطحية ويبقى ما تحت التربة متجلداً، فإن المياه الناجمة عن الذوبان لا تستطيع التسرب إلى طبقة الجمد السرمدي، لذلك تصبح الطبقة السطحية «شبعة بالمياه»، مما يساعدها على التحرك من فوق المنحدرات باتجاه الأودية. ويمكن أن تحدث هذه الظاهرة على سطوح لا يزيد انحدارها على درجتين إلى ثلاث درجات. تكون عادة حركة المواد بطيئة جداً لا تتجاوز بضعة سنتمترات في السنة. ومع ذلك يمكن رصدها بقياس سرعتها بقياسات حقلية خاصة تجري على عدة فصول من السنة. أما أشكالها الخارجية فيمكن تمييزها بسهولة من هياكلها السطحية التمجعية التي يزداد تجمعها أحياناً بشكل يجعل أجزاءها المطوية تتراكب فوق بعضها بعض. وتحمل التربة المنزلفة معها الغطاء النباتي الموجود فوقها، وتأخذ مظهر السجادة المجددة إذا كان هذا الغطاء عشبياً.

ب - الزحف creep: تتمثل عملية الزحف في الحركة البطيئة جداً على السطوح قليلة الانحدار. وتشمل هذه العملية كلاً من زحف التربة والحطام الصخري والصخور. وإن زحف التربة هو من أكثر الأنواع انتشاراً، التي تتميز بمحدوث تشوهات وإزاحة في سياجات المزارع وفي أعمدة الكهرباء والهاتف وثنى جذوع الأشجار. وتبدي عادة الطبقات الصخرية المتكشفة انحداراً شديداً في اتجاه مسار الزحف (شكل ١١-٢).



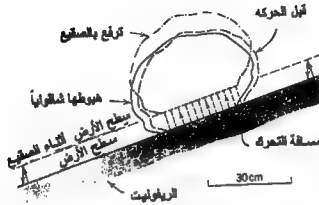
شكل (١١-٢) تأثير زحف التربة في الهياكل السطحية والمهد الصخري.

وتساهم في عملية الزحف عوامل كثيرة أهمها مرتبة في الجدول التالي:

الرفع الصقيعي	التجلد والنوبان يؤديان إلى رفع وهبوط الحبات (عدم تشبع التربة بالماء).
التبريد والتسخين	يسببان تغيرات في حجم الحبات
نمو وتفسخ النباتات	عملية الحفر الناتجة عن نمو جذور النباتات، وكذلك الفجوات المتشكلة من تفسخها تساهم في التحرك إلى أسفل للمنحدرات.
نشاط الحيوانات	تؤدي الحشرات والديدان والحيوانات الحفارة إلى تحريك التربة.
الانحلال	يساهم انحلال الفلزات في زحف التربة.
نشاط الثلوج	يتم في المناطق التي غمر فيها مواسم ثلجية. حيث يميل الغطاء الثلجي في المنحدرات إلى الانزلاق نحو الأسفل محرّكاً معه التربة.

جدول (١) أهم العوامل التي تساهم في زحف التربة.

يعد فعل الصقيع من أهم العوامل التي تساهم في عملية الزحف في المناطق الباردة، التي تتكرر فيها عمليات التجمد والنوبان. ففي الشتاء تتجمد المياه التي تملأ الفراغات بين الحبات وتؤدي إلى تمددات حجمية تدفع سطح الأرض في اتجاه عمودي على سطح المنحدر. وفي الربيع، عندما تذوب الأتربة المتجمدة، تحدث تحركات عكسية. فإذا افترض أننا نلاحظ حبة من التربة تلامس سطح المنحدر فهي ترتفع مبتعدة عن السطح أثناء التجمد، وتتحرك وتسقط عند النوبان مشدودة شاقولياً بالثقالة الأرضية، مما يؤدي إلى تحركها لمسافة قصيرة نحو أسفل المنحدر (شكل ٢-١١) ويؤدي تكرار هذه العملية عدة مرات خلال فترات طويلة إلى الزحف.



شكل (١٧٢): يوضح زحف حبيبات التربة نحو أسفل للمحدر نتيجة تساقط التجمد والذوبان. وتشير الأسهم إلى المسافة التي تنتقلها.

لقد تبين نتيجة قياسات دقيقة لزحف التربة أن سرعة الزحف تتغير حسب شدة الانحدار. فقد قدرت سرعة التحرك في بعض منحدرات الكولورادو بما لا يزيد على ١,٥ مم/سنة فوق انحدار ١٩° و ٩,٥ مم/سنة فوق انحدار ٣٩°. ويوفر المناخ الرطب شروطاً مناسبة للزحف، كما يعمق الغطاء النباتي الكثيف حدوثه. وقد تعمل جذور النباتات على تثبيت الفتات الصخري وإيقاف الزحف، ومثال على ذلك في بعض الهضاب العشبية في إنكلترا حيث قدر معدل الزحف نحو ٠,٠٢ مم/سنة على انحدار ٣٣° درجة.

### الانخسافات subsidence

إن حالات تبدد الكتل المسابقة تشمل جميعها حركات أفقية بالإضافة إلى الحركات الشاقولية، أما في حالة الانخسافات فهي نقل كتل ضخمة من الصخور أو الأراضي في اتجاه شاقولي فقط، وهي ترافق عادة العمليات المنجمية واستخراج المعادن من باطن الأرض. أما الأسباب الطيفية التي تؤدي إلى تشكل الانخساف فهي:

١- وجود صخور قابلة للانحلال مثل الصخور الكلسية والملحية.

٢- كثرة الشقوق والفواصل في الصخور.

٣- رص المواد الناتج عن ازدياد الثقل على صخور طرية أو غير متماسكة.

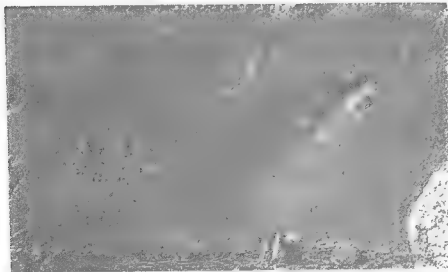
٤- تراكم طبقات سميكة من الرسوبات أو من الجليديات.

كما تؤدي الهزات الأرضية والانفجارات إلى أحداث مماثلة.

## رسوبات تبدد الكتل

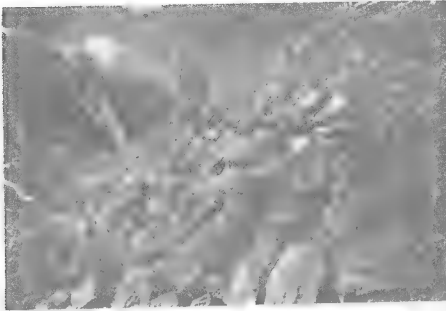
أ - الكولوفيوم **Colluvium**: وهي رسوبات مفككة، عديمة الفرز، ذات أحجام مختلفة، تميل أطراف حبيباتها إلى الأشكال الزاوية، توجد في قاعدة المنحدرات وتحرك غالباً بالزحف. وهذه الصفات تميزها عن الرسوبات التي تنقل بالوسائل المائية أو الهوائية، التي تكسب أطراف حبيباتها شيئاً من التدورة وتكون مفروزة وتوضع بشكل طبقات.

ب - الصخور الانزلاقية والتالوس **slide rocks & taluse**: توجد هذه الرسوبات في قاعدة الجروف الصخرية في المناطق التي تنشط فيها عمليات الحث الميكانيكي، وتكون على شكل تراكمات من الأنقاض الصخرية تغطي الأجزاء السفلية للجروف. وتتصف قطعها الصخرية وحبيباتها بأنها زاوية، وتراوح في مقاييسها ما بين الجلاميد الضخمة إلى الحبيبات الرملية تعرف عادة بالتالوس (شكل ١٣-٢)، وتسمى الرسوبات المولفة للتالوس بالصخور الانزلاقية.



شكل (١٣-٢) للتالوس عند قاعدة الجرف. الجلاميد الكبيرة قد تحجرت وأحطت بمقدمته.

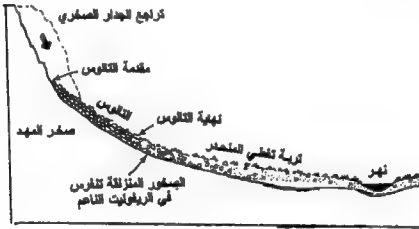
إن انتقال المواد المؤلفة للتالوس من أماكنها الأصلية فيتم بالتساقط أو بالانزلاق أو بالدرجة، وتشكل عادة سطوحاً شديدة الانحدار (شكل ٢-١٤) وتميل المواد الناعمة فيها إلى الاستقرار في الفراغات المتوافرة بين القطع الصخرية الخشنة. وبما أن القطع الصخرية الخشنة تسارع في تحركها أكثر من الناعمة فهي تسبقها ويكون تجمعها الأعظمي في أسفل المنحدر. ويمكن للقطع الكبيرة أن تتدحرج أكثر لتشكيل طوقاً حول نهاية التراكم (الشكل ٢-١٣). أما معدل ازدياد التراكم فيعود إلى شدة التحوية التي تتبع بدورها إلى المناخ.



شكل (٢-١٤): تالوس في قاعدة الجرف الصخري مؤلف من صفور منزقة ضخمة.

وهو في حالة توازن (للمواد المساقطة من أعلى للجرف تساوي تقريباً المواد التي تتحرك إلى أسفل المنحدر). حيث ميل المنحدر نحو (٤٠°) درجة وهي زاوية المسكون للقطع الكبيرة وزاوية الأطراف. وفي هذه الحالة تتوازن قوة الثقل مع القوى الأخرى وبخاصة قوة الاحتكاك.

ومع استمرار إضافة مواد جديدة إلى مقدمة التالوس تتحرك المواد الواقعة في نهايته نحو أسفل المنحدر. ويكون زحف هذه المواد بطيئاً جداً للدرجة يكون الوقت كافياً لتتحوى كيميائياً. وهكذا تتحول الصخور الانزلاقية الخشنة تدريجياً إلى مسود ناعمة قابلة لحمل كميات كبيرة من الرطوبة في فراغاتها المسامية الصغيرة مما يساعد على الزحف والوصول إلى الوديان حيث تغذي المجاري المائية بالرسوبات (شكل ١٥-٢).



شكل (١٥-٢): بشكل التالوس حلقة وصل بين المهد الصخري في أعلى المنحدر والريفوليت للناعم في أسفل المنحدر.

### إثارة أحداث تهدد الكتل Triggering of mass - wasting

تظهر عمليات تهدد الكتل للوهلة الأولى بأنها تحدث بشكل عشوائي إلا ' تواتر حدوثها وشدة أخطار بعضها ينسب إلى نشاطات غير عادية أهمها:

أ - الصدمات المفاجئة **sudden shocks**: يؤدي حدوث صدمات مفاجئة مثل الهزات الأرضية إلى تحرير الكثير من الطاقة التي تجعل التراكبات الصخرية والفتاتية الموجودة على سطوح المنحدرات بحالة عدم توازن. ففي عام ١٩٢٩ أدى وقوع هزة أرضية شديدة بدرجة ٧,٧ (مقياس ريختر) في شمال غرب أيسلندا الجنوبية إلى

حدوث ١٨٥٠ انزلاقاً أرضياً في منطقة لا تزيد مساحتها على ١٢٠٠ كم<sup>٢</sup>، حيث كان مركز الهزة قريباً منها. وقد قدرت كمية المواد المنزلقة بنحو ٢١٠,٠٠٠ م<sup>٣</sup> من الأنقاض الصخرية لكل كيلو متر مربع من اليابسة. ويمكن أن تحدث انزلاقات الأراضي بسبب تعديل الانحدار أو بإزالة قاعدتها الداعمة عند شق الطرقات أو بتسوية منحدرات اصطناعية تزيد على زاوية الاستقرار. ومن الممكن تلافى حدوث الانزلاقات بإنشاء الجدران الاستنادية الداعمة. ومع ذلك يمكن أن تتغلب ضغوط الانزلاق الريغوليت على متانة هذه الجدران وتجعلها عديمة الفائدة.

أما عمليات هبوط الأراضي وغيرها من الانزلاقات فيمكن إثارة نشاطها بتتبع قطع قاعدتها بالفعل الحثي لبعض البحاري المائية، أو بفعل الأمواج الشاطئية. ويكثر حدوث الانزلاقات في المنحدرات الشاطئية أثناء حدوث العواصف الشديدة التي توجه الأمواج البحرية القوية لتضرب في اليابسة وتحفر في الصخور الشاطئية وتحطمها، وبخاصة في الصخور الطرية الواقعة في أسفل بعض الجروف.

أما العامل الرئيس الذي ينشط مختلف الانزلاقات فهو توفر الأمطار الغزيرة والثلوج التي تمتد لفترات طويلة، وتجعل الريغوليت شديد التشرب بالماء.

ب - **الاندفاعات البركانية volcanic eruption**: وهي عامل مهم من عوامل إثارة وتنشيط الانزلاقات الأرضية. فالبراكين الانفجارية التي تندفع منها القطع الصخرية والفتات الصخري الخشن والناعم، تشكل أكواماً هائلة من الفتات الناري، يمكن لبعضها أن يستقر على سطوح منحدرية بزوايا قد تكون مناسبة للاستقرار، قد يزول استقرارها أثناء النشاط البركاني، كما يمكن أن تسهل تحركها هطول الأمطار الغزيرة أو ذوبان الثلوج التي تؤدي إلى تحرير كميات كبيرة من الماء، مما يجعلها تنزلق بسهولة وبسرعة وتشكل اللاهات.

وأخيراً يجب أن نذكر أن تزايد عدد السكان وعمليات البناء وشق الطرقات تساهم أيضاً في حدوث الانزلاقات الأرضية، وبالتالي حدوث كوارث وخسائر بالأرواح والممتلكات.

## الفصل الثالث

### المياه الجارية السطحية

إن للمياه الجارية تأثيراً كبيراً في حياتنا اليومية، وحضارتنا الإنسانية، فهي العصب الحيوي على وجه الأرض، ومن أهم العوامل التي تؤثر في سطح الأرض، فهي تحث مجراها في الصخور ناقلة المفتتات إلى البحيرات والمحيطات حيث ترسب فيها، وهي العامل الرئيسي في نقل المواد الناتجة عن التجوية وتبدد الكتل. وإن معظم الأشكال التضاريسية التي نراها حولنا، ما هي إلا نتيجة العمل المشترك للتجوية وتبدد الكتل والأنهار.

#### الدورة المائية في الطبيعة: المياه على اليابسة

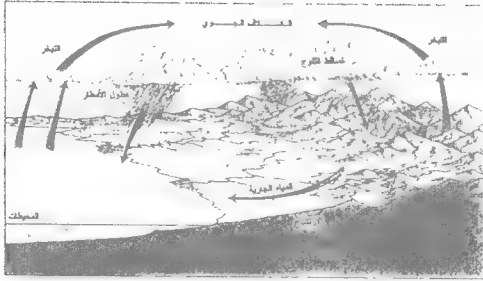
تحتوي اليابسة ما يقرب ٢,٥ ٪ من مجمل مياه الأرض. ونحو نصف هذه المياه يكون بحالة صلبة على شكل جليديات وغطاءات جليدية ضخمة في جزيرة غرينلاند وقارة القطب الجنوبي. ويضاف إلى ذلك أن معظم المياه الحرة في اليابسة موجود في باطن الأرض. وتوجد كميات قليلة منها على السطح في البحيرات والمستنقعات وبحيرات السدود والأنهار. ولا تشكل هذه الأخيرة سوى نسبة بسيطة جداً لا تتعدى الواحد بالمليون من المياه الموجودة في العالم.



ماذا يحدث للماء في حال سقوطه على اليابسة؟ تتوزع مياه الأمطار في مجالات ثلاثة: الأول منها يجري على سطح الأرض ويعرف بالمياه الجارية runoff، والثاني يتسرب إلى ما تحت السطح، والثالث منها يعود مباشرة إلى الجو بالتبخر. وتستهلك النباتات جزءاً كبيراً من مياه الأمطار في جذورها وسوقها وأوراقها، كما تعيد إلى الجو جزءاً كبيراً من المياه التي تستهلكها بعملية التنح transpiration. ففي هذه العملية تعطي النباتات كمية لا يستهان بها من بخار الماء إلى الجو. فقد بينت الدراسات أن حقلاً من المزروعات ينتج سنوياً كمية من الماء تكفي لتغطية مساحته الكلية بمساحة (٦٠) سنتمراً، بينما تعطي الغابات ضعف هذه الكمية إلى الجو. وبما أنه من الصعب التمييز بين كميات المياه الناتجة من التبخر عن تلك الناتجة من التنح، فيستعمل مصطلح موحد وهو التبخر التنحي evapotranspiration للتعبير عن تأثيرهما المشترك.

أما الماء المتبخر من البحار والمحيطات واليابسة، فيعود منه نحو ٢٥٪ إلى اليابسة على شكل أمطار وتلوج أحياناً، وتفوق المياه التي تهطل على اليابسة المياه التي تبخر منها نحو ٧٩٪. أما الكميات التي تهطل في البحار والمحيطات فهي عموماً أقل من المياه المتبخرة منها. ويعدل عدم التوازن هذا ما ينقل من مياه اليابسة بشكل مباشر إلى البحر بالأنهار والجاري المائية المختلفة وينابيع المياه الجوفية تحت البحر (شكل ١-٣). وتختلف معدلات الأمطار من مكان لآخر، كما تختلف معدلات المياه الجارية على السطح أو المتسربة في باطن الأرض.

تشمل المياه الجارية المياه التي تجري بشكل حر على سطح اليابسة دون أن تكون محصورة بأقنية (مياه الجريان)، والمياه التي تجري في أقنية الأنهار والجاري المائية. وهي تقوم بدور فعال في تشكيل سطح الأرض بالمقارنة مع العوامل الأخرى، لأنها تؤثر في جميع المناطق تقريباً حتى في المناطق الجافة.



شكل (١.٣): الدورة المائية.

### مياه الجريان:

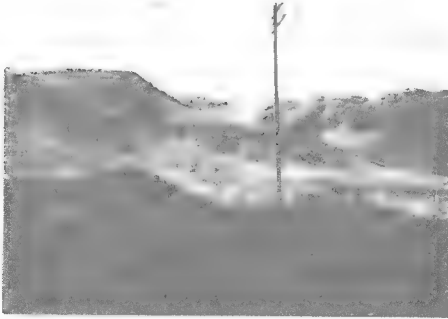
الجريان هو عمل المياه التي تجري بحرية في شبكات مائية متفرقة على سطوح الأراضي المنحدرة، وسرعان ما تتركز في مجار أو أخاديد، وتنتهي هذه بالتجمع في نهر ما. يوجد إذن انتقال تدريجي من جريان الماء المتفرق إلى التحدد فالحت بواسطة الأنهار.

وقد يحدث إثر هطول أمطار غزيرة على سطح منتظم ضعيف الانحدار، أن يشكل الماء طبقة متصلة. إلا أنه لا يلبث أن ينحصر في شبكات. فإذا كانت التربة عارية فإن موادها الناعمة جداً هي التي تجرف أول الأمر. والأثلام المحفورة على هذا النحو تطمرها الفتات بين فترات تساقط المطر. وعند هطول الأمطار الغزيرة من جديد، تأخذ الشبكات المائية مسارات تختلف عن المسارات السابقة. فشبكة الخطوط المائية تتنقل باستمرار، وتقوم في النهاية بتنظيف السطوح كافة. أما عندما

تكون التربة مغطاة بالنباتات، فإن الجذور النباتية تُبطئ وتعميق عملية التفتيف، في حين تزداد نسبة المياه المتسربة.

ويسبب جريان الماء حت المنحدرات والسفوح الجبلية وتجميع الأنقاض في أسفلها، فهو يؤدي إلى تخفيف الانحدار الوسطي فيها.

أما التحدد فيعقب جريان الماء المتفرق في الأقسام المنخفضة في المنحدرات، وقد يحدث التحدد وحده عندما تكون التربة متجانسة، وغير نفوذة، وذات حبات ناعمة، ومعرضة لمطار غزيرة (شكل ٣-٢).



شكل (٣ - ٢): مظاهر التحدد في صفوف الأيوسين الأكنى للكلمية (نمر).

تتعلق أفعال جريان الماء بالعوامل التالية:

١- كمية المياه الجارية على سطح الأراضي. وهذه الكمية مرتبطة بدورها بمقدار التهطل من جهة، وبقدرة التربة والنباتات التي تغطيها على امتصاص الماء من جهة أخرى.

٢- سرعة جريان الماء التي تزداد مع شدة الانحدار، وتنقص بوجود غطاء نباتي كثيف.

٣- تركيب التربة، إذ إن العناصر الناعمة تجرف بسهولة أكبر من العناصر الخشنة.

تؤثر طبيعة الأراضي في جريان الماء من حيث درجة نفوذيتها، ومن حيث حبات صخورها. فالغضار يتخلد بسهولة، بينما يتخلد الكلس النفوذ بصورة أقل. أما الحجر الرملي والرمل فيمارسان تأثيراً متوسطاً يتغير حسب صلابته الصخر. وتتكون في الأراضي غير المتجانسة أشكال متنوعة جداً من التضاريس.

### الأنهار والجاري المائية

لقد رأينا فيما سبق أن مياه الأمطار حين تجري على سطوح مستوية منحدرية تفرش هذه السطوح ويسمى ذلك غسل المنحدرات slope wash. ولا تلبث هذه المياه المنحدرة على السطح أن تتجمع في مجارٍ مائية صغيرة، تتلاقى بدورها في جداول أكبر وهكذا حتى يتشكل مجرى رئيس. وتعرف الجاري المائية الدائمة perennial بالأنهار rivers. أما الروافد الصغيرة التي لا تجري فيها المياه إلا إثر هطول الأمطار فهي مؤقتة ephemeral، ومن الممكن أن تتلفق المياه في مجرى مائي مستمر على امتداد الموسم الرطب، وبخاصة حين يكون منسوب الماء الجوفي قريباً من سطح الأرض، بحيث ينفذ هذا الجرى، وتنضب مياهه خلال موسم الجفاف فهي مجارٍ متقطعة intermittent أو موسمية.

فالنهر الرئيس له عدة روافد tributaries أصغر، وهي بدورها لها أيضاً روافد أصغر فأصغر حتى الجاري الصغيرة المؤقتة، وجميعها تشكل ما يسمى نظام

التصريف drainage system، كما تدعى المنطقة التي تحتويها أحواض التصريف drainage basin. وتسمى أحواض التصريف الصغيرة مستجمع الأمطار watersheds. ويفصل عادة بين أحواض التصريف المتجاورة تضاريس مرتفعة أو سلاسل جبلية تدعى القواسم divides. كما يدعى الجزء الفاصل بين مجريين مائيين متجاورين بالقاسم أيضاً. ويمثل عادة في الخرائط بخط وهمي يمر بأعلى أجزاء المنطقة بحيث تفصل بين رؤوس الروافد العليا لكل نهر من الأنهار عن رؤوس الروافد العليا للأنهار الأخرى التي تتبع من المنطقة نفسها (شكل ٣-٣). ومن المفيد جداً وضع خرائط لأحواض التصريف بحيث تساعد على دراسة المصادر المائية ورصد الفيضانات.



شكل (٣-٣): قسم رئيس جلي يواصل بين أحواض التصريف، وقواسم أصغر تفصل بين المجري المائية المتجاورة.

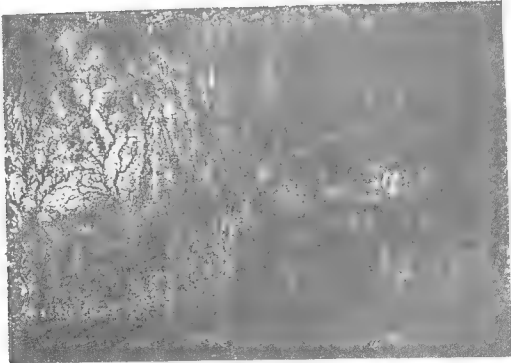
## أنماط التصريف النهري Drainage patterns

يقصد بنمط التصريف النهري الصورة والنظام العام الذي يبدو عليه كل نهر بروافده الرئيسة والثانوية. إذ إننا نلاحظ أن خطوط التصريف المائي تظهر مرتبطة ببعضها بعضاً في أشكال خاصة، بحيث تعكس بوضوح بعض العوامل التي تحكممت

فيها، وجعلتها تتخذ هذه الأشكال أو الأنماط. ومن هذه العوامل نذكر :

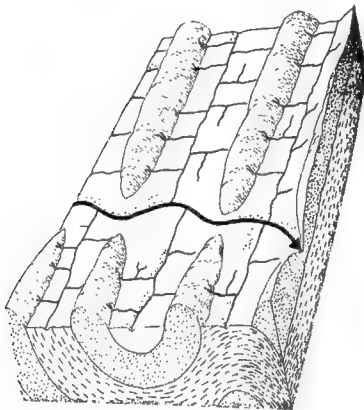
- ١- طبيعة الانحدار.
- ٢- ترتيب الوحدات الصخرية واختلاف التركيب الصخري.
- ٣- البنية الجيولوجية.
- ٤- الحركات التكتونية المؤثرة في تعديل نظام الصرف.

آ- التصريف النهري الدندريتي **Dendritic drainage**: يتكرر - عساً - في المناطق ذات الصخور المتجانسة التي تتجاوب مع عمليات الحت والتعرية بتجاوباً متماثلاً في جميع الاتجاهات. وتلتقي الروافد بالنهر الرئيس بزوايا حادة، وكلماً كَوْن النهر لنفسه رافداً واضح المعالم، اتصلت بالتالي بهذا الرافد روافد ثانوية إلى أن يتكون نظام نهري أشبه بتفصينات الشجرة (شكل ٤-٣).



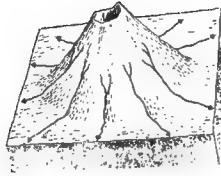
شكل (٤.٣): صورة جوية للتمط الدندريتي.

ب - التصريف النهري العريشي **Trellis drainage**: يتطور هذا النمط على أرض ذات مساحات أصابها الطي، بحيث تتجاور على السطح صخور قاسية وصخور طرية. يؤدي إلى حصر الجريان المائي في أماكن الصخور الطرية وإلى ترابط المجاري المائية الفرعية مع الرئيسة بزوايا شبه قائمة تعطي شكل شبكة عريشية (شكل ٥-٣).



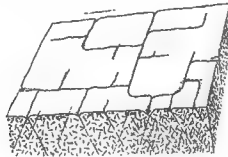
شكل (٥-٣): النمط العريشي.

ج - التصريف النهري الشعاعي **Radial drainage**: تأخذ فيه المجاري المائية اتجاهاتها كنتيجة طبيعية للانحدار. بحيث تنفرع خارجياً في جميع الاتجاهات من منطقة مركزية عالية. وهذا النمط يميل إلى التطور على منحدرات البراكين المتشكلة حديثاً (شكل ٦-٣).



شكل (٦-٣): النمط الشعاعي.

د - التصريف النهري المستطيل أو المتعامد Rectangular drainage: يتطور هذا النمط على الصخور النارية المشققة، حيث ينحني فيه النهر الرئيس انحناءات واضحة بزوايا قائمة، كما تلتقي الروافد بالنهر الرئيس بزوايا قائمة، مما يدل على مدى تأثير النهر وروافده بالفواصل والانكسارات الموجودة في الصخور النارية (شكل ٧-٣).

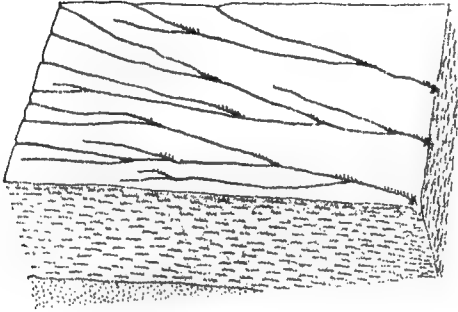


شكل (٧-٣): النمط المتعامد.

هـ - التصريف النهري المتوازي Parallel drainage: ينتشر هذا النمط بكثرة في المنحدرات شديدة الميل ذات التركيب الصخري المتجانس، وبخاصة



الصخور المولفة من حبيبات ناعمة كالغضاريات. ويكون فيه النهر الرئيس وروافده تقريباً شبه متوازية (شكل ٨-٣).



شكل (٨.٣): اللمط المتوازي.

تعطي أهمية خاصة لأحواض التصريف التي تتألف منطقتها من صخور كلسية ذات حت كارستي. حيث تحفر المياه الجارية والمتغلغلة فيها ما يسمى الحفر الغائرة أو البالوعات sinkholes. وأيضاً تشكل المغاور تحت السطح بحيث يسهل تسرب المياه السطحية إلى باطن الأرض، ويؤدي إلى تلاشي الكثير من الأنهار و المجاري المائية. ولا يبقى منها سوى بعض المجاري الغزيرة غير المترابطة.

## تدفق الأنهار Flow of rivers

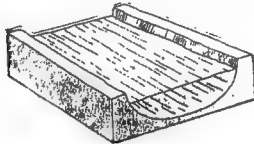
تحتوي مياه الأنهار صافقة حركية كبيرة، تؤدي إلى تأثير جيولوجي مهم في المناطق التي تجري فيها. وتنشأ هذه الطاقة من اندفاعها بعامل الثقالة الأرضية إلى المستويات الأدنى. وتعرف بالطاقة الكامنة  $E = m.g.h$ ، التي تتحول إلى طاقة حركية:

$E = \frac{1}{2} m.v^2$ . إذن يكون  $E = m.g.h = \frac{1}{2} m.v^2$ ، وهكذا فإن جريان الماء في القناة النهرية يعتمد على الطاقة المتوافرة فيه، وهي ترتبط بشكل رئيس بسرعة الجري المائي، التي لها علاقة بالانحدار وشكل القناة النهرية وحجمها، وكمية المياه المتدفقة فيها.

يجري الماء في الأنهار بإحدى طريقتين:

١- تدفق صفائحي Laminar flow حيث تتحرك جزيئات الماء molecules في مسارات مستقيمة.

٢- تدفق مضطرب Turbulent flow حيث تتحرك جزيئات الماء في اتجاهات مختلفة وبصورة عشوائية (شكل ٩-٣).



التدفق الصفائحي



التدفق المضطرب

شكل (٩-٣): التدفق الصفائحي والتدفق المضطرب.

حين تكون سرعة التيار المائي منخفضة، والقناة النهرية ملساء وغالية من العقيات، فإن الماء يتحرك بتدفق صفالحي. وبالمقابل حين تكون كمية المياه المتدفقة كبيرة، وتكثر العوائق في مجراه وجوانبه، فإن احتكاك الماء يزيل التدفق الصفالحي، وتصبح حركة تدفقه سريعة ومضطربة. وعادة يكون تدفق المياه في المناطق السهلية تدفقاً صفالحيّاً في أكثر الأوقات. أما في أيام الفيضانات فإن التدفق يصبح مضطرباً، بسبب زيادة كمية المياه والمواد الرسوبية في القناة النهرية.

### العوامل المتحكممة في سرعة تدفق مياه الأنهار

تؤثر في سرعة تدفق مياه الأنهار عوامل مختلفة يمكن إيجازها بما يلي:

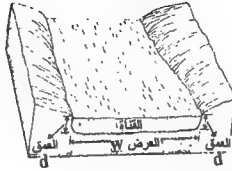
١- انحدار القناة النهرية.

٢- شكل القناة النهرية.

٣- كمية المياه في القناة النهرية.

١- **الانحدار القناة النهرية:** إن انحدار القناة النهرية له تأثير كبير في سرعة جريان المياه، ويعرف بمقدار الانخفاض الشاقولي بالنسبة إلى مسافة ثابتة. فكلما كان الانحدار شديداً كانت السرعة أكبر. وبصورة عامة تكون الأتنية النهرية شديدة الانحدار بالاقتراب من عالياتها، وذات انحدار خفيف بالقرب من سافلتها. لذلك تنخفض سرعة التيارات المائية حين تهبط المياه من أماكن جبلية إلى أماكن سهلية.

٢- **شكل القناة النهرية:** إن شكل المقطع العرضي للقناة النهرية يؤثر في سرعة المياه المتدفقة. حيث يتم احتكاك بين جزئيات المياه وقاع وجوانب القناة. وإن مجموع طول الجوانب وعرض القناة يُعرف بالحيط البلبل *wetted perimeter* ويرمز له بـ (WP) (شكل ١٠٣).



شكل (١٠.٣) المحيط المبلل للقناة النهرية:  $WP = d + w + d$

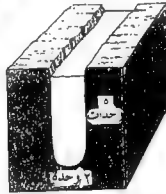
فكلما ازداد محيط المقطع المبلل زاد الاحتكاك وقلت سرعة الماء. فعندما يكون المقطع العرضي للقناة النهرية نصف دائري، يكون لها حد أدنى من الاحتكاك (شكل ١٠.٣).

A. قناة عريضة وضحلة



مساحة المقطع العرضي ١٠ وحدات مربعة  
المحيط = ١٢ وحدة.

B. قناة ضيقة وعميقة



مساحة المقطع العرضي ١٠ وحدات مربعة  
المحيط = ١٢ وحدة.

C. قناة نصف دائرية



مساحة المقطع العرضي ١٠ وحدات مربعة  
المحيط = ٧,٩ وحدة.

شكل ١٠.٣: تأثير شكل القناة في سرعة التيار.

بالرغم من أن مساحة المقاطع العرضية للأقنية الثلاث واحدة، إلا أن سرعة التيار في القناة نصف الدائرية تكون أكبر لأن لها محيطاً مبللاً أقل.

كما هو واضح في الشكل إذا تساوت مساحة المقطع العرضي، وجميع العوامل الأخرى للقناة النهرية، فإن شكلها يؤثر في سرعة المياه فيها.

كذلك تختلف سرعة المياه المتدفقة في المكان الواحد من القناة النهرية باختلاف العمق، فهي تتناقص تدريجياً مع العمق، وتكون السرعة القصوى في منتصفه تحت السطح بقليل، لأن المياه تتحرك بحرية بعيدة عن الاحتكاك بالجوانب والقاع، هذا إذا كانت القناة النهرية مستقيمة، أما إذا كانت متعرجة فالسرعة تختلف من مكان لآخر على طول القناة.

٣- كمية المياه في القناة النهرية: تأخذ معرفة كمية المياه في القناة النهرية أهمية كبرى في دراسة مختلف المظاهر النهرية، بما فيها الحث والتعرية، وحركة الرسوبات والإمداد المائي، وتحليل أخطار الفيضانات ورصد حدوثها. وتعرف كمية المياه المتدفقة عند نقطة معينة من النهر خلال وقت معين بالتدفق النهري أو التصريف النهري discharge. وهو يختلف باختلاف الأوقات وعلى طول القناة النهرية. ويحسب بضرب مساحة المقطع العرضي في سرعة الماء، ويقاس عادة بالأمتار المكعبة في الثانية. وأما مساحة المقطع العرضي فيساوي عرض القناة (بالأمتار) × عمق القناة (بالأمتار). ويعبر عن ذلك بالمعادلة التالية:

$$Q = w \times d \times v$$

سرعة الماء    العرض    التصريف

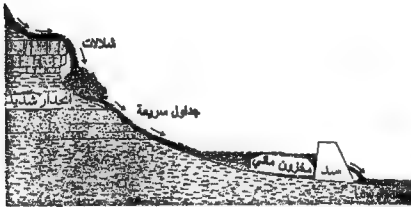
يتغير العمق باستمرار عبر النهر، وكذلك تختلف السرعة في كل نقطة من المقطع العرضي. ولهذا يكون من الصعب تقدير هذه القيم بدقة متناهية ويعبر عنها بمعادلات وسطية.

إن حجم المقطع العرضي لأي مكان من القناة النهرية يعكس الشروط المسيطرة في ذلك المكان. ومع ذلك لا يكون كبيراً للدرجة كافية لاستيعاب كميات كبيرة من المياه عند هطول أمطار غزيرة. وفي هذه الحالة تفيض المياه على جوانب النهر، وتنتشر على الأراضي المتاخمة لمشكلة السهول الفيضية floodplains.

## البروفيل الطولي للقناة النهرية Longitudinal profile

البروفيل الطولي للنهر هو الخط الذي يرسم على طول سطح النهر من المنبع حتى المصب (شكل ١٢-٣). ففي المرحلة الأولى من حياة النهر يتفق هذا الخط مع الانحدار الأول لسطح الأرض، ويساير الخط الأفقي عند مصب النهر. يطلق على هذا الخط بروفيل التوازن.

فإذا كانت عملية الحت واحدة في أجزاء النهر المختلفة، بقي النهر محافظاً على انحداره الأول، دون أن يتغير بروفيله الطولي. إلا أن عملية الحت تختلف من مكان لآخر على طول مجراه. ففي سافلة النهر يهبط سطح الأرض إلى مستوى قريب من سطح البحر، ويضعف الحت الشاقولي وينشط الرسيب، وبالمقابل تكون عملية الحت في عالية النهر نشطة إلى حد ما مع أن الروافد التي تغذي النهر تكون قليلة. أما في الأجزاء الوسطى من مجرى النهر فيكون الحت أعظم ما يمكن. لذلك يأخذ بروفيل التوازن شكل قوس مقعر، مع العلم أن هذا البروفيل لا يمثل تماماً التوازن الحقيقي للمجرى المائي نظراً لتغيرات سرعة الماء والصيب، وعدم انتظام وتجانس الطبقات الصخرية التي يمر فوقها النهر.



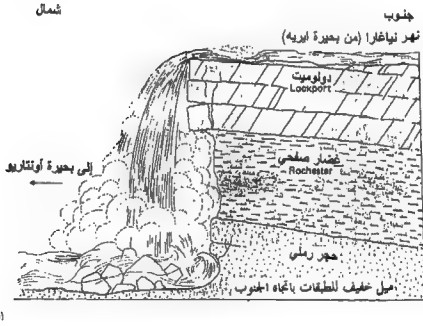
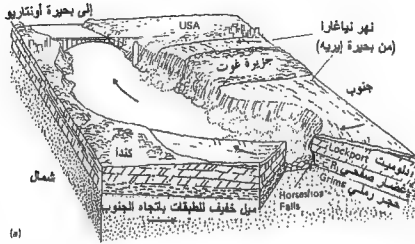
شكل ١٢-٣: البروفيل الطولي للقناة النهرية.

تتشكل الشلالات في عالية النهر، لإنحدار مياه النهر من حافة الصخور الصلبة على الصخور اللينة. تشير الأسهم إلى اتجاه التيار المائي.

يتحكم في انحدار المجرى النهري طبيعة التضاريس وأنواع الصخور التي يمر فيها، ويختصر وجود الشلالات أو المساقط المائية waterfalls والجلداول السريعة rapids في عالية النهر، حيث تكون الانحدارات شديدة، ويكثر وجود الصخور القاسية.

إن من أهم المظاهر التي توجد أحياناً في مجرى الأنهار هي الشلالات، ويعود تشكيلها إلى انخفاض مفاجئ في مكان ما من مسار النهر الطولي. وهذا يكون في حالة حدوث الفوالق التي تؤدي إلى تشكيل حروف صخرية على امتدادها، أو عندما تجري الأنهار على منحدرات مؤلفة من صخور متفاوتة في مقاومتها للحت. وفي مثل هذه الحالة تشكلت شلالات نياغارا في مجرى نهر سانت لورانس في جزئه الممتد بين بحيرتي إيري Erie وأونتاريو Ontario (نهر نياغارا) إذ تتألف الطبقات الصخرية العليا من صخور دولوميتية قاسية تتركز فوق طبقات من الغضار الصفحي والحجر الرملي (شكل ٣-١٣).

تفرش مياه نهر نياغارا فوق صخور الدولوميت، وتهبط من حافتها شاهقة الارتفاع على الصخور اللينة، وتشكل دوامات مائية شديدة في القاع، التي تعمل على حت الطبقات الصخرية اللينة وتعميق القاع. وبصورة تدريجية تفرغ تحت الدولوميت وتؤدي إلى انهياره، وبهذا تتراجع شلالات نياغارا باتجاه المنبع. وقد قدر تراجعها منذ تشكيلها نحو ١١ كم. ولا بد أن تستمر عملية تراجع هذه الشلالات حتى تنصرف مياه بحيرة إيري إلى بحيرة أونتاريو الأقل منها منسوباً.



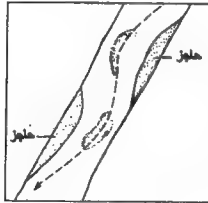
شكل ١٣.٣: 2 - شلالات نياغارا: الشلالات الأمريكية والشلالات الكندية يفصلهما جزيرة كوت Goat. b - مقطع في الشلالات الكندية Horseshoe يوضح الطبقات الصخرية وعمل المياه في تراجع الشلالات.



ومع استمرار اهتزاز اليابسة وتهديمها تزول الاختلافات التضاريسية المؤدية إلى تشكل الشلالات، حيث تحل محلها جداول مائية سريعة. وهنا لا بد من القول إن وجود الجداول السريعة في مكان ما، يعني أنها كانت في سابق عهدها شلالات، فقد تنشأ من تدفق مياه الأنهار فوق صخور معترضة مقاومة في مناطق شديدة الانحدار.

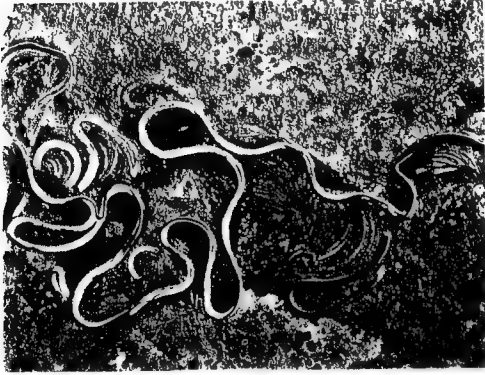
### نماذج الأقنية النهرية Channel patterns

أ - الأقنية المستقيمة **Straight channels**: عندما ننظر إلى المجاري النهرية من الجو، نجد أن معظمها يتبع مسارات ملتوية، ما عدا الأماكن المتأثرة بالفوالق والفواصل، حيث تكون فيها المسارات مستقيمة ولمسافات محدودة. وقد أظهرت دراسات الأجزاء المستقيمة من الأقنية النهرية أن التيار المائي يبدي تأرجحات جانبية، ويظهر ذلك الخط الواصل بين أعماق الأجزاء في القناة النهرية (شكل ٣-١٤). ومع تأرجح التيار نحو أحد الجانبين، تتوضع الرسوبات في الجانب المقابل حيث تكون السرعة أقل. ويحدث العكس حين يكون التأرجح إلى الجانب الثاني. وتعرف الرسوبات المتوضعة بالحواجز bars. وهكذا يتناوب توضع الرسوبات الحجازية على الجانبين، وتكون بداية لتشكل المنعطفات النهرية.



شكل ٣-١٤: رسم تخطيطي يوضح لموج تيار المائي في القناة النهرية المستقيمة. يشير الخط المنقط إلى أعماق أجزاء القناة، ولهم إلى اتجاه تيار المائي.

ب ـ أقية المنعطفات Meandering channels: إن هذا النموذج من الأقية شائع الانتشار، ويتألف من سلسلة من الالتواءات التي تعرف بالمنعطفات meanders (شكل ١٥-٣).



شكل ١٥-٣: صورة جوية للمنحطقات للنهرية. تظهر فيها عدد من البحيرات الهلالية المقطوعة من النهر.

تشكل أقية المنعطفات عندما يصل النهر إلى مناطق سهلية. إذ إن المواد الرسوبية المنقولة وحت الجوانب يختلفان حسب سرعة التيار. فمن الطبيعي أن يحفر الماء المتحرك بشكل قوسي قاعدة الجانب الخارجي (المقعر)، ولا تلبث أن تسقط الأجزاء العلوية منه إلى داخل القناة مما يجعله شديد الانحدار، ويعرف هذا الجانب بضفة القطع cut bank. بينما تكون سرعة التيار أقل في الجانب المقابل (المحذب)، فيوضع رسوباته على شكل ألسنة في مجرى النهر تعرف بالحاجز الرئيس point bar.

ويستمر ازدياد انحناء مجرى النهر، وتقرب أطراف المنعطف تاركة معابر ضيقة من

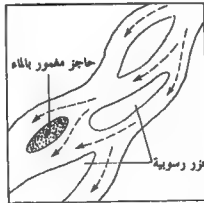
الأرض تعرف برقبة المنعطف meander neck، ولكن سرعان ما تخترق مياه النهر هذه الرقبة في موسم الفيضان وتغلق المنعطف وتسير بخط مستقيم. ثم تكوّن مياه النهر بعد ذلك سداً من الرسوبات يفصل الجرى الجديد عن الجرى المهجور، وقد تتجمع المياه الراكدة في أجزاء من المنعطف المهجور لتشكل بحيرات (شكل ١٦-٣). إن أهم ما يميز هذه طوق الثور Oxbow، تدعى بحيرات طوق الثور (شكل ١٦-٣). إن أهم ما يميز هذه المنعطفات هو زحفها المستمر نحو مصب النهر. ويرجع هذا إلى حث الجوانب المقعرة المواجهة للمصب، بينما يحدث الترسيب عند الجوانب المحدبة التي تواجه المنبع.



شكل ١٦-٣: أ. التحرك الجانبي للمنحطات النهرية بواسطة حث الضفة الخارجية، وتوضع الرسوبات في الضفة الداخلية. وبذلك يستطاع للنهر أن يغير مسار قناته.  
ب - مراحل تكون بحيرة طوق الثور.

لقد كانت منعطفات نهر الميسيسيبي وغيرها من الأنهار الكبيرة موضع دراسات مطولة من قبل الجيولوجيين والمهندسين، تتعلق بمشكلات الفيضانات والملاحة. وتوصلوا منها إلى أن المنعطفات النهرية ليست وليدة الصدفة. إذ إنها تتشكل في الألفية النهرية ذات الانحدارات الخفيفة، التي تحمل مياهها الحقيبات ناعمة الحبيبات. كما وجدوا أنها تتشكل أيضاً في الأنهار التي لا تحمل مياهها مواد رسوبية. ذلك أن التيار المائي بطبيعته يحمل نوعاً من الطاقة الحركية، التي تضيع أو تتحول باستمرار الحركة والاحتكاك. وإن الطبيعة تميل نوعاً ما إلى ضياع أو تحول منتظم لهذه الطاقة. بحيث أن ضياع أو تحول الطاقة في أي جزء من أجزاء التيار المائي يكون مساوياً ذلك في الجزء الآخر الذي يساويه. وقد وجد أن هذا الضياع أو التحول المنتظم يمكن تحقيقه بأفضل ما يمكن في الجرى المتوي للتيار. وعليه فإن نموذج المنعطفات النهرية يعكس الطريقة التي تتدفق فيها الأنهار بأقل مقاومة ممكنة، وتوزع فيها الطاقة بشكل متجانس ومنتظم على امتداد مجاريها.

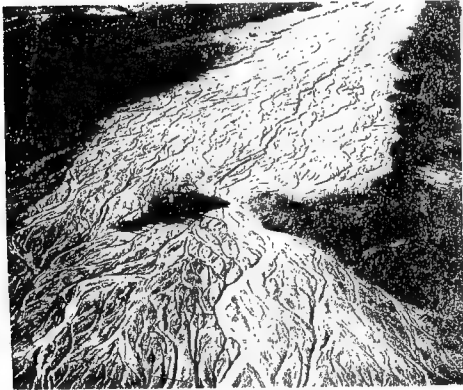
حـ - الألفية المضفورة Braided channels: يتشكل هذا النموذج من الألفية في سهول الفيضان، ويتصف بأن القناة النهرية تنقسم إلى عدد من الألفية ثم تلتقي بشكل معقد يشبه إلى حد ما الضفائر. وتكون هذه الألفية ضحلة ومغطاة بغطاء لحقي رقيق، تفصلها عن بعضها بعضاً حواجز أو جزر رسوبية طولانية (شكل ١٧-٣).



شكل ١٧-٣: رسم تخطيطي يوضح شكل الألفية المضفورة.

قد يحدث أحياناً في موسم الفيضان أن يجلب النهر كميات كبيرة من المواد المفتتة، بحيث لا تقوى مياهه على حملها فترسبها في قاعه على هيئة حواجز أو جزر حصوية رملية، مما تضطر مياه النهر لأن تنقسم إلى مجاري متعددة عندما ينخفض منسوبها بعد انتهاء فترة الفيضان.

يتشكل هذا النموذج أيضاً في مجاري الأنهار التي تقع في مناطق جافة، حيث تجلب إليها مياه الأمطار الغزيرة والموقته كميات كبيرة من الرسوبات. كذلك يحدث أثناء مواسم الدفء في مناطق وجود الجليديات (شكل ١٨٣).



شكل ١٨٣: صورة جوية توضح تشكل الأتربة المصفورة قرب نهاية جليدية في حالة الانصهار.

## مستوى القاعدة Base Level

مستوى القاعدة للنهر هو أدنى مستوى يصل إليه النهر في تعرية واديه. ويعد مستوى سطح البحر مستوى القاعدة النهائي Ultimate base level، حيث يتوقف عنده حت اليابسة. إذ إن مياه أي نهر عندما تصب في البحر تنخفض الطاقة الكامنة إلى الصفر، وتصبح عندها غير قادرة على القيام بأي عمل من أعمال النقل والحت. ما عدا الأنهار التي تصب في أحواض داخلية مغلقة ليس لها نهر مصرف إلى البحر، ويكون فيها القاع غوراً انهدامياً تشكل نتيجة عمليات تكتونية مثل حوضي بحر الميت ووادي الموت Death Valley في كاليفورنيا، في هذه الحالة تستطيع الأنهار أن تحت دون مستوى سطح البحر العالمي.

غير أنه يوجد مستويات دنيا للحت غير مستوى سطح البحر تعرف بمستوى القاعدة المحلي local base level، فتشمل الصخور الصلبة ذات المقاومة العالية للحت المائي، حيث تصبح هذه الصخور حواجز مؤقتة تؤدي إلى ارتفاع منسوب الماء أمامها، ولا يستطيع النهر أن يواصل عمليات الحت دونها. وكذلك إذا ما انتهت مياه النهر إلى بحيرة، فإن سطح مياه هذه البحيرة هو المستوى الأدنى للحت بالنسبة لهذا النهر. ويضاف إليها الأنهار الرئيسة التي تعمل كمستوى قاعدة لروافدها.

أما مستوى القاعدة المؤقت Temporary base level: فقد يتكون عندما تنتهي مياه النهر إلى بحيرة تمثل مستوى قاعدة محلياً (شكل ٣-١٩). فإذا كانت البحيرة ضحلة، تزاكم فيها الرسوبات تدريجياً، ويرتفع منسوب الماء فيها مع مرور الزمن، ويتشكل لها نهر مُصرف في نقطة أخفض من مستوى النهر الرافد، وعندها ينخفض منسوبها وتنصرف المياه منها تماماً، وتتحول في النهاية إلى مسطح من الرسوبات البحرية، حيث يخفر النهر قناته فيها ليتابع جريانه في النهر المصرف.



شكل ١٩.٣: (١) - تأثير مستوى القاعدة المحلي على البروفيل الطولي للنهر.

(٢) - البروفيل الطولي للنهر بعد زوال البحيرة واستمرار تصديق الوادي.

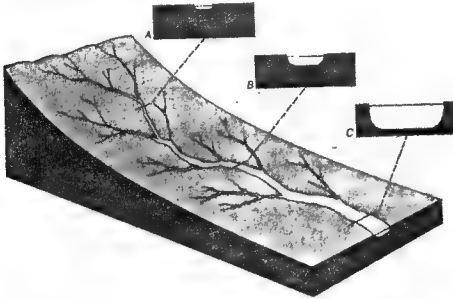
وقد لا ينظر إلى البحيرات والصخور الصلبة على أنها مؤقتة ولكنها تعد جيولوجياً، وعلى المدى الطويل، ظواهر غير دائمة ولا بد حتماً أن تنتهي جميع عمليات الحت إلى مستوى القاعدة النهائي (سطح البحر أو المحيطات).

### النهر المهدد The graded stream

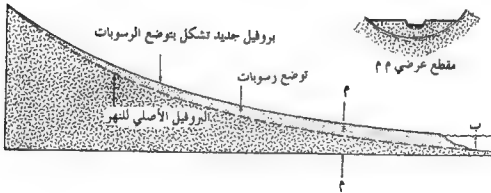
إن أية تغيرات في صبيب النهر، أو في مستوى القاعدة، أو في تركيب الصخور الذي يمر فوقها النهر، تؤدي إلى تعديل في شكل المقطع العرضي والبروفيل الطولي للقناة النهرية.

ففي مثل هذه التغيرات فإن النهر يعدل قناته بشكل تنخفض عدم النظامية إلى حدّها الأدنى، ويؤمن أقل طاقة ممكنة لتستهلك في حركة المياه وحمل الرسوبات فقط. وهذا يشمل غالباً توسيع أو تعميق المقطع العرضي للقناة في حالة ازدياد الصبيب (فيضانات، روافد جانبية) أو هبوط مستوى القاعدة (شكل ٢٠-٣). أو نقصان أبعاد القناة نتيجة الترسيب في حالة ارتفاع مستوى القاعدة، أو وجود صخور ذات مقاومة عالية في طريق النهر (شكل ٢١-٣). وبهذا يكون الاتجاه الإجمالي نحو بروفيل طولي ذي انحدار لطيف ومنظم وهو بروفيل التوازن، حيث تكون جميع العوامل في حالة توازن. وقد استخدم الجيولوجيون مصطلح النهر المهدد للتعبير عن النهر الذي

وصل إلى مرحلة التوازن، حيث يكون له من الانحدار والمواصفات الأخرى ما يحافظ على سرعة كافية لحمل الرسوبات فقط. فالنهر المهد لا يمت ولا يرسب وإنما يكتفي بنقل الرسوبات.



شكل ٢٠٣: مساهمة الروافد الجذبية في توسيع القناة النهرية.



شكل ٢١٣: تغيير أبعاد القناة بنتيجة ارتفاع مستوى القاعدة.



ومع أن مفهوم النهر المهدد عدد وواضح، إلا أن التوازن التام لا يتوقع أن يتحقق طبعياً في أي نظام نهري. ففي حوض تصريف لأي نهر نموذجي لا بد من حدوث تغيرات تخل بهذا التوازن، إذ يمكن لسحابة ممطرة أن تزيد صبيب أحد الروافد 'نهريه، أو أن يؤدي حدوث انهيار في ضفة النهر إلى ازدياد كمية الرسوبات فيه بشكل مفاجئ، أو أن تقل سرعته إذا صادف النهر في طريقه صخوراً مقاومة للحت أو رسوبات معترضة. ففي مثل هذه الأحداث تأخذ عملية التعديل مجراها. إذ إن كل واحدة منها تخل بالنظام وتبعده عن حالة التوازن التام. ولهذا السبب نقول إن النهر قد وصل إلى مرحلة شبه متوازنة quasi - equilibrium لأن هناك تعديلات وتغيرات تجري بشكل مستمر.

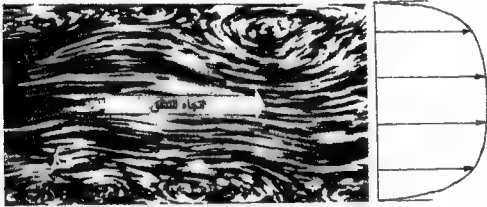
### نقل الرسوبات بواسطة الأنهار Transport of sediments by streams

تلعب الأنهار و المجاري المائية دوراً فعالاً في تحريك المواد الرسوبية ونقلها، فهي تتوزع في اليابسة توزيعاً واسعاً بالمقارنة مع توزع الجليديات. يضاف إلى ذلك أن وجودها يشمل مختلف مناطق اليابسة وليس محصوراً بالنطاقات الشاطئية بالمقارنة مع الأمواج والتيارات البحرية. كما أن مياه الأنهار قادرة على تحريك رسوبات ذات تنوع حجمي واسع يشمل الجلاميد الصخرية إذا ما قورنت بقدرة الرياح على النقل. وعلاوة على ذلك تشكل المياه الجارية على اليابسة أو سائلاً كيميائية فعالة قادرة على حل المواد الصخرية والتفاعل معها.

تنقل الأنهار حمولتها المولفة من:

- ١- مواد صلبة تشمل حبات خشنة تتحرك منزلقة على قاع النهر أو قريباً منه تدعى الحمولة السريرية bed load.
- ٢- حبيبات ناعمة تكون معلقة في النهر وتدعى الحمولة المعلقة suspended load، حيث يرسبها النهر فوق اليابسة وتعرف بالحقبات alluvium.
- ٣- مواد منحلة ناتجة عن التحوية الكيميائية تدعى الحمولة المنحلة dissolved load.

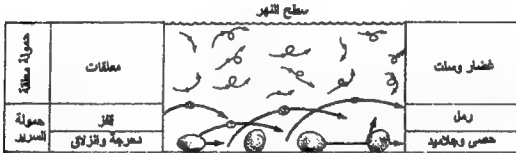
**أهمية التدفق المضطرب في نقل الرسوبات:** لقد رأينا سابقاً أن تحرك جزيئات الماء في النهر لا يكون بمعظمه تحركاً نظامياً موازياً للمجرى. فهي تتحرك في اتجاهات عديدة وبسرعات متباينة (التدفق المضطرب)، وإن الاضطراب عامل مهم في حركة الرسوبات النهرية. إذ يجعل الحبيبات الصغيرة معلقة في التيار المائي حيث تنقل إلى سافلة النهر. ويتولد الاضطراب بمحاذاة جوانب القناة النهرية وقيعانها حيث يواجه التيار المائي أعظم الاحتكاكات والإعاقة (شكل ٣-٢٢).



شكل ٣-٢٢: يوضح التدفق المضطرب للتيار المائي في لقطة النهرية كما تُرى من الأعلى. ويكون الاضطراب أعظمياً في جوانب القناة. ويوضح الرسم للتخطيطي سرعة التيار المائي عبر القناة النهرية.

**١- حولة السرير النهرى:** وتعرف أيضاً بحمولة القاع، فهي تتألف من قطع وشظايا وحبيبات فلزية وصخرية ناجمة من التجوية. تتراوح في حجمها من الجلاميد حتى الرمل الناعم. وأنه ليس من السهل التمييز ما بين حولة القاع والحمولة المعلقة، لأن الحبات التي تتحرك بمحاذاة القاع في لحظة ما، يمكن أن تصبح معلقة إذا ارتفعت سرعة التيار والعكس صحيح، ومع ذلك تحت أي ظرف من الظروف لا بد من وجود جزء من حولة السرير غير معلق بشكل دائم.

إن المعدل الوسطي لحركة حمولة السرير أقل من معدل حركة الماء، لأن الحبات ليست بحالة حركة ثابتة، فهي تتحرك بشكل متقطع، بالدرجة rolling أو الانزلاق sliding أو القفز saltation، الذي تتحرك فيه الحبات مسافات قصيرة بقفزات تعد حركة وسطية ما بين التعلق والدرجة أو الانزلاق. وتستمر الحبات الرسوبية في تقدمها على امتداد سرير النهر. ويستمر القفز ما دامت التيارات المائية مضطربة بشكل كاف لأن ترفع حجوم معينة من الحبات عن القاع، وإفساح المجال لها للهبجرة إلى مسافة نحو سافلة النهر، حتى تغلب الثقلية وتجعلها تستقر. وتؤدي هذه العملية في كثير من الأحيان إلى تكسر الحبات، كما يؤدي الاحتكاك والاصطدام الناجم من عملية القفز إلى تكسير التواءات البارزه في الحبيبات، وجعل سطوحها ملساء ومدورة. أما القطع الكبيرة التي لا يستطيع التيار رفعها عن القاع، فإنها تتحرك إلى الامام نتيجة دفع التيار لها، واعتماداً على شكلها فإنها إما أن تنزلق أو تتدحرج (شكل ٢٣-٣).



شكل ٢٣-٣: نقل الحمولة النهرية: أ - نقل الحمولة السريوية يكون بالدرجة والانزلاق والقفز.

ب - نقل المواد المسطحة والفضارية على شكل معلقات.

وأما الجلاميد الكبيرة فتنتقل بوساطة المياه النهرية أثناء الفيضانات، كذلك تنقل بوساطة التيارات المائية القوية في المنحدرات الجبلية.

ومع أن حمولة السرير تتراوح ما بين ٥٪ - ٥٠٪ من الحمولة الاجمالية للنهر إلا أنها ذات أهمية كبيرة بالنسبة لقدرة النهر على تعرية قناته.

٢- **الحمولة المعلقة Suspended load**: إن الصفة العكرة لكثير من الأنهار ترجع إلى وجود الحبيبات الناعمة السلتية والغضارية المنقولة بالحالة المعلقة. غير أنه في حالة الفيضانات تزيد هذه الحملولة بشكل ملحوظ وتشمل معلقات ذات أحجام أكبر، كما هو الحال في النهر الأصفر في الصين، فقد قدرت حمولته في حالة الفيضانات بما يساوي وزن المياه الحاملة له. ويعود لونه إلى الحملولة المضغمة من السلت المنقول نحو البحر من رسوبات اللوس الواسعة الانتشار، والتي تبطن الجزء الأكبر من واديه.

يتحكم في نوع المواد المعلقة وكميتها عاملان: سرعة الماء وسرعة استقرار الحبيبات. أما سرعة الاستقرار **settling velocity** فهي السرعة التي تسقط فيها الحبيبات خلال السائل الموجودة فيه، فالحبيبات الأكبر تسقط بسرعة أكبر باتجاه قاع النهر. وكذلك يؤثر شكل الحبيبات وكثافتها في سرعة الترسيب، فالحبيبات المدورة والكثيفة تترسب بسرعة أكبر من الحبيبات المسطحة وذات الكثافة المنخفضة.

وبسبب أن سرعة التيارات الصاعدة المتشكلة في المياه النهرية المضطربة تزيد على السرعة التي يمكن الغضار والسلت من الاستقرار بفعل الثقالة الأرضية. فإن مثل هذه الحبيبات تميل لأن تبقى معلقة لفترة أطول فيما لو كانت المياه غير مضطربة. فهي قد تترسب وتستقر فقط عندما تهبط السرعة ويهدأ الاضطراب، كما هو الحال في سهول الفيضان والبحيرات والبحار. لذلك فإن نقل الحبيبات كحمولة معلقة يختلف بشكل كبير عن حبيبات حمولة القاع التي تتحرك فقط بالدرجة والقفز. وتقدر كمية المواد المعلقة بنحو ثلثي الحملولة الإجمالية للأنهار.

إن معظم الحملولة المعلقة في الأنهار مشتقة من مصدرين. أحدهما التربة الناعمة المفسولة من مناطق غير عممية بغطاء نباتي، مما فيها الحقول الزراعية، والثاني هو الرسوبات الخاضعة للحت أو المعاد تشغيلها من ضفاف المجرى النهرية.

٣- الحمولة المنحلة: تأتي هذه المواد من عمليات التحوية الكيميائية للصخور المحيطة من جهة، وفعل مياه النهر في الحل والاذابة من جهة أخرى. وتتألف الحمولة المنحلة من ايونات معدنية ولا معدنية، حيث تشارك فيها بشكل رئيس سبعة ايونات فقط من مجمل هذه الحمولة، وهي البيكربونات والكلسيوم والسيليكا والسلفات والكلور والصوديوم والمغنيزيوم والبوتاسيوم. أما النترات والحديد والفلور فتوجد بكميات ضئيلة جداً (جداول ٢-٣).

الايونات	الرمز الكيميائي	جزء بالمليون
البيكربونات	$(HCO_3)^-$	٥٨,٤
الكلسيوم	$(Ca)^{+2}$	١٥
السيليكا	$(SiO_2)$	١٣,١
السلفات	$(SiO_4)^-$	١١,٢
الكلور	$(Cl)^-$	٧,٨
الصوديوم	$(Na)^+$	٦,٣
المغنيزيوم	$(Mg)^{+2}$	٤,١
البوتاسيوم	$(K)^+$	٢,٣
النترات	$(NO_3)^-$	١
الحديد	$(Fe)^{+2}_{+3}$	٠,٧

جدول ٢. المعدل الوسطي لكمية المواد المنحلة في مياه الأنهار العذبة.

تقدر كمية المواد المنحلة في مياه الأنهار بوحدة أجزاء المادة المنحلة بمليون وحدة من الماء (جزء بالمليون). وقد ترتفع في بعض الأنهار لتصل إلى نحو ١٠٠٠ جزء بالمليون، إلا أن المعدل الوسطي لهذه المواد يتراوح ما بين ١١٥ و ١٢٠ جزءاً بالمليون. وتختلف كميتها من نهر لآخر حسب طبيعة المناخ وحيولوجية المنطقة. وهي تساهم بأقل من ١٠٪ من مجموع الحمولة النهرية.

## الكفاية والاستيعاب النهري

عندما يتحول نهر هادئ الجريان إلى نهر مضطرب أثناء موسم الفيضان، فإن قابليته على نقل الرسوبات تزداد بشكل واضح، وتعد عادة هذه القابلية بمصطلحي الكفاية النهري والاستيعاب أو الاستطاعة النهري.

الكفاية competence النهري هي أقصى حجم للحبات الرسوبية، التي يستطيع النهر نقلها تحت مجموعة من الشروط الهيدرولوجية. وتقاس عادة بقطر أكبر الحبات الرسوبية التي يمكن أن تتحرك كحمولة للقاع النهري. تعتمد كفاية النهر بشكل رئيس على سرعة التيار الناقل، إلا أنها ليست متناسبة معها بشكل بسيط. فإذا ارتفعت السرعة إلى الضعف زاد قطر الحبيبات المنقولة مثلاً من ٢مم إلى ٦٤مم أي بمقدار  $(2^6)$  مرة. وهذا يفسر كيف تتحرك جلاميد كبيرة أثناء الفيضان، للدرجة تستطيع مياه الفيضان أن تخرب الجسور والسكك الحديدية، بينما لا يمكن للنهر في الشروط العادية أن ينقل سوى حصيات ناعمة.

تتغير كفاية التيار المائي من مكان لآخر على طول المجرى، بحيث يمكن أن تظهر هذه التغيرات في الرسوبات النهري المتكشفة على جانبي المجرى، التي تظهر فيها تناوب رسوبات خشنة وناعمة وهي سجل لتغير كفاية المياه النهري.

أما الاستيعاب capacity فهي الحمولة القصوى التي يستطيع النهر نقلها من المواد الصلبة. وتقاس بحجم الرسوبات التي تمر من نقطة معينة من القناة النهري في وحدة زمنية. وهي تعتمد بشكل رئيس على الصبيب النهري، وانحدار القناة النهري، وطبيعة المواد الرسوبية. وقد أظهرت تجارب مخبرية، محددة الشروط، أن ازدياد الانحدار والصبيب مع ثبات الشروط الأخرى يؤدي إلى ازدياد الحمولة النهري، وقد أثبتت القياسات الحقلية ذلك.

إن وجود المواد الخشنة في حمولة السرير النهري يزيد في وعورة القناة النهري، التي تؤدي إلى انخفاض في سرعة التيار المائي، التي تؤثر بدورها في انخفاض استطاعة النهر على حمل المواد الصلبة.

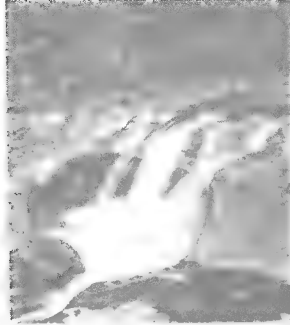
## الحث النهري Stream erosion

تقوم الجاري المائية بحت أفقيتها في عدة طرائق مختلفة أهمها رفع وتحريك المواد المقتة غير متماسكة، وبوساطة البري أو السحج abrasion، وبوساطة عمليات الاذابة.

يبدأ العمل الحثي للأنهار من سقوط المطر على اليابسة، فإن اصطدامها بالأرض يكون له قدرة على تحريك الحبيبات من التربة، ويكون ذلك واضحاً عندما تكون الأمطار غزيرة وفي حالة العواصف المطرية، حيث تجري المياه على سطح الأرض وتكتسب قوة احتكاكية كافية لتحريك ونقل المواد المقتة. وعندما تتجمع هذه المياه في الألفية النهرية يصبح لها قدرة تحريكية أكبر بفعل الجريان المضطرب، الذي ينتج منه حركة المياه في دوامات واتجاهات مختلفة، إذ تستطيع تحريك المواد الرسوبية من الرمل الخشن حتى الجلاميد الكبيرة. ويساعد على هذا التحريك الهيدروليكي hydraulic action كون المواد الصلبة الموجودة في الماء ذات وزن أقل من وزنها العادي، حتى إن المياه النهرية تستطيع أن تندفع بقوة داخل الشقوق وبين سطوح التطبيق لتقتلع أجزاء من مكونات قاع القناة النهرية.

يتضمن العمل الحثي للأنهار أيضاً التأثير الميكانيكي للمياه، الناجم من احتكاك المواد الصلبة مع القاع والجوانب ومع بعضها بعضاً، مما يؤدي إلى اهتراء الصخور التي تتحرك فوقها المياه، وتحطيم وسحق المواد المنقولة، وهذا ما يسمى البري أو السحج. وكذلك فإن اصطدام القطع الصخرية مع بعضها ومع صخور القناة النهرية يؤدي إلى تكسرها، وهذا يكون واضحاً في مساقط الشلالات.

من المظاهر الشائعة في قيعان بعض الأودية النهرية وجود منخفضات دائرية تعرف بالحفر الوعائية pot-holes (شكل ٣-٢٤) تشكلت نتيجة العمل الحثي للجزيئات التي تتحرك في شكل دوامات، حيث تعمل الحركة الدائرية السريعة لحبات الرمل والحصى كأداة حفر لحفر قاع الوادي النهرية، وباستمرار هذه الحركات الدوامية ينتج منها حفر قد تصل إلى بضعة أمتار في عمقها وطولها.



شكل ٣. ٢٤ - حارة وعالية في قاع وادي نهري.

يضاف إلى ذلك أفعالاً كيميائية ناجمة عن وجود مواد حمضية في المياه النهرية التي تتفاعل مع صخور القناة النهرية وتؤدي إلى انحلالها، وتعرف هذه العملية بالتآكل corrosion، ويكون هذا واضحاً في القناة النهرية المكونة من الصخور الكلسية.

إن العمليات الحثية النهرية ليست ثابتة أو مستمرة. فقد تمضي أسابيع عديدة دون عمليات حثية تذكر. إلا أنها تعود وتنشط خلال فترات العواصف المطرية والفيضانات، كما تنشط في موسم الربيع إثر ذوبان الثلوج، وقبل عودة الحياة النباتية إلى النشاط.



## تشكل الأودية النهرية

تشكل معظم الأودية التي تجري فيها مياه الأنهار بفعل ثلاث عمليات مترابطة ومتلازمة وهي:

١- تعميق الوادي. ٢- توسيع أو تعريض الوادي. ٣- إطالة الوادي.

١- تعميق الوادي: تكون عملية تعميق الوادي شديدة وواضحة في المناطق التي يكون ارتفاعها عن المنسوب القاعدي كبيراً. وهذا يتحقق في المرتفعات الجبلية، حيث يؤدي الحث الشاقولي إلى تعميق الوادي النهرى، نتيجة اندفاع المياه وتحرك كتلتها الضخمة مع ما تحمله من مفتات وقطع صخرية فوق سطوح شديدة الانحدار. ويتميز هذا الجزء من النهر بوجود المساقط المائية والجداول السريعة وينعدم فيه توضع الرسوبات. وبصورة عامة يؤدي تشكل الحفر الوعائية في قاع الوادي النهرى إلى تعميقه.

٢- توسيع الوادي: إن توسيع الوادي النهرى يكون في حث المواد التي تتألف منها جوانب الوادي، إذ إن ضرب المياه مع ما تحمله من رسوبات وحطام صخري يؤدي إلى تخريب أجزاء قاعدية منها، وبالتالي إلى انهيار الأجزاء العليا في مياه النهر، وبهذا يتوسع الوادي جانبياً. وبالوقت نفسه تشكل الكتل الصخرية المنهارة عوائق تؤدي إلى دوامات مائية تحفر في القاع وتعمق الوادي.

لا توجد مرحلة معينة يبدأ فيها النهر بتوسيع واديه، وإنما يحدث ذلك في المراحل المبكرة من تشكل الوادي. حيث يكون المجرى المائي في هذه المرحلة كثير الانحناءات، فتضطر المياه ومفتاتاتها أن تتجه نحو خارج المنحنيات فتحفر الضفة الخارجية المقعرة، في حين توضع اللحيات في الزاوية الميتة الداخلية المخدبة. ويكون من نتيجة هذا الفعل المضاعف زيادة تقوس المنحنيات وتعريض الوادي.

٣- إطالة الوادي: تتم بعدة طرق أهمها:

أ- الحث التقهقري أو الحث الصاعد **Headward erosion**: يجري الحث النهرى في هذا النمط من مسافة النهر باتجاه عاليته. ويكون واضحاً في أسفل المنحدرات وفي

تراجع الشلالات. حيث تكون سرعة التيار المائي واستطاعته أعظمية في أسفل المنحدر، مما يؤدي إلى خلق موجة حتية تصعد من أسفل المنحدر باتجاه عاليته، وتتضاءل شدة المنحدر نتيجة عملية الحت هذه ويزداد النهر طولاً.

ب - تشكل المنعطقات النهرية: يؤدي تشكل المنعطقات النهرية إلى زيادة في طول الوادي النهرية.

ج - زيادة أطوال الأنهار عند مصباتها: يحدث ذلك عندما ينخفض منسوب ماء البحر الذي ينتهي إليه النهر، مما يؤدي إلى أن يشق النهر طريقه عبر الأراضي الجديدة التي ظهرت.

د - ثمر الدلتا: يزداد طول بعض الأودية النهرية في الحالات التي تنمو فيها دلتاتها داخل مياه البحر.

### الترسيب النهرية

يبدأ النهر بالترسيب عندما يفقد استطاعته على حمل الرسوبات التي تنقلها مياهه، أو التي تجلبها إليه عوامل أخرى. ويتبع فقدان استطاعته من انخفاض سرعة التيار المائي الذي يرجع للأسباب التالية:

١- تناقص انحدار مياه النهر في انتقاله من منطقة مرتفعة إلى منطقة سهلية منبسطة.  
٢- تعرض مجرى النهر لحركات تكوينية قد تؤدي إلى التغيير في بروفيله الطولي أو ازدياد في تعرجاته.

٣- زيادة انتشار مياه النهر على مساحة أوسع. ويحدث هذا غالباً في أيام الفيضانات حيث تفيض مياهه على كلتا ضفتيه والأراضي المجاورة.

٤- وجود بعض السدود الطبيعية أو الاصطناعية في طريق الجرى المائي الناجمة من انزلاق الأراضي أو بناء السدود.

٥- نقصان كمية مياه النهر إما لأسباب مناخية أو لتسرب مياه النهر عبر صخور نفوذة في واديه.

٦- توقف سرعة التيار المائي عندما ينتهي إلى مستوى قاعدة محلي أو أساسي.

## المظاهر الترسيبية للأنهار Depositional features of stream

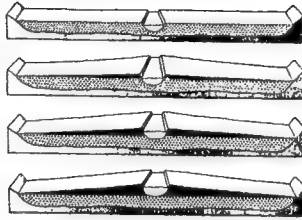
### ١- السهول اللحية أو سهول الفيضان Flood plains

تشكل السهول اللحية في الأماكن السهلية الممهدة، حيث يتعرج النهر بمنعطفات عديدة. وتتكون رسوباتها من الرمال الخشنة والحصى الصغيرة التي ترسبت أصلاً كرسوبات حواجز رئيسة على طول المجرى المتعرج (شكل ٣-١-أ). ومع مرور الوقت تصبح التوضعات النهرية شديدة السماكة ومتصلة بحيث لا ينكشف إلا القليل من المهد الصخري على طول المجرى.

وفي أيام الفيضانات يجلب النهر كميات كبيرة من المياه المحملة بالرسوبات، فيمتلئ المجرى المائي بالمياه وتفيض وتغمر الأراضي السهلية المجاورة مكونة سهول الفيضان التي تتكون من مواد ناعمة من الرمل والسلت والغضار.

تبني الأنهار الكبرى في مواسم الفيضان طبقات سميكة من الرسوبات على ضفافها تعرف بالسدود الطبيعية natural levees (شكل ٣-٢٥). تنشأ هذه السدود نتيجة تجاوز المياه المحملة بالرسوبات ضفاف النهر لتغمر السهل اللحي، حيث تنخفض سرعتها بشكل مفاجئ، وتضع قسماً كبيراً من حمولتها الخشنة (الرمل والسلت) بالقرب من جوانب النهر، وتضع المواد الأنعم فوق بقية السهل اللحي.

وبمرور الزمن ويتكرر عمليات الفيضان يزداد تراكم الرسوبات، وتكون سماكتها أعظمية بمحاذاة القناة النهرية، وتنخفض تدريجياً بالابتعاد عنها. وتكون بمستوى أعلى من مستوى سهل الفيضان، لذلك فإن المياه لا تعود إلى القناة النهرية بعد زوال الفيضان، وقد تبقى لفترة طويلة مشكلة مستنقعات خلف هذه السدود.



شكل ٢٥.٣: مراحل تشكل السدود الطبيعية. ويلاحظ في الشكل توسع القناة النهرية وارتفاع قاعها لأن العمل الحثي والترسيبي يكونان في أقصى نشاطهما في أيام الفيضان.

## ٢- المصاطب النهرية

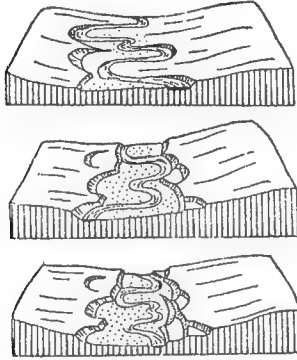
تحتوي معظم الأودية النهرية على مصاطب terraces وهي سهول فيضان مهجورة، تشكلت عندما كان النهر يجري في مستويات أعلى من مستواه الحالي (شكل ٢٦-٣).



شكل ٢٦.٣: تتشكل المصاطب المزدوجة نتيجة الحث الشاقولي في توضعات سهل الفيضان.

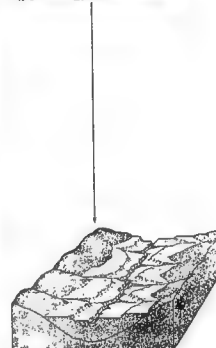
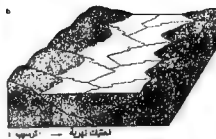
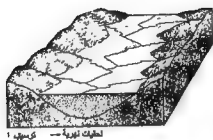


وتكون في غاية من التعقيد وعدم الانتظام، لأن انجرى النهري في مناطق المنعصبات كـ: التغيير، حيث ترحف المنعطفات بشكل مستمر نحو المصب، مما يؤدي إلى إزاحة لمصاطب في أحد جوانب النهر وإبقائها في جانب آخر (شكل ٢٨-٣).



شكل ٢٨٣: تشكل المصاطب غير المزدوجة في مناطق المنعطفات النهرية.

إن التمييز بين المصاطب المزدوجة وغير المزدوجة أمر مهم. إذ إن كل مجموعة من المصاطب المزدوجة تدل على فترة ترسيبة لتشكل سطحاً رسوبياً [شكل ٢٩-٣، (٣ و ١)]. أو حتى جانبياً عبر اللحقيات أو صخور المهذ، تتبعها عملية حث شاقولي [شكل ٢٩-٣، (٤ و ٢)]. وبهذا نستطيع أن نقول إن تشكل المصاطب المزدوجة يشمل مراحل متعاقبة من الترسيب (aggradation) والحث الشاقولي (degradation). وبالمقابل فإن مجموعة من المصاطب غير مزدوجة لا تعكس إلا مرحلة واحدة من عملية الحث الشاقولي (شكل ٢٩-٣، b).



شكل ٢٩.٣: 2 - مراحل تشكل المصلطب المزوجة.

b - تشكل المصلطب غير المزوجة.

## ٢- الدلتات والمراوح اللحية

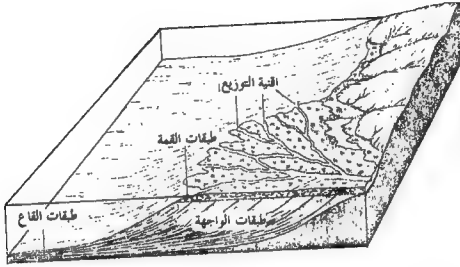
إن نهاية المطاف للمياه الجارية على اليابسة هي البحار والمحيطات. فأنجاري المائية الصغيرة ترفد الأكبر منها، وهي بدورها ترفد أنجاري الرئيسة التي بدورها تصب في البحار. والقليل من الأنهار التي تضيع مياهها قبل وصولها إلى البحر، وهذا يحدث في مناطق تكشفات الصخور الكلسية ذات الحت الكارستي، حيث تتسرب مياهها عبر فتحاتها النفوذة، يضاف إلى ذلك أنهار المناطق الجافة التي تضيع مياهها تدريجياً بالتبخير والارتشاح داخل الأرض. كما توجد أنهار تصب في بحيرات ليس لها مخرج مثل الأنهار التي تصب في البحيرات المالحة.

تتأخر سرعة مياه النهر في منطقة مصبه في البحر إلى الصفر، ويرسب جزءاً كبيراً من محموله الخشنة والناعمة، ويبقى جزء من المواد الغضارية معلق في مياه البحر ليتوضع بعيداً عن الشاطئ. وينشأ من هذا الردم الرسوبي المستمر جزء جديد ينضم إلى اليابسة ويدعى بالدلتا delta، ويوجد لها امتداد تحت سطح البحر. ومن الممكن أن تنشأ الدلتات كلياً تحت البحر بسبب التغيرات في الامتداد الرسوبي من وقت لآخر.

توضع المواد المحمولة عند مدخل النهر على شكل طبقات متدرجة في أحجام حبيباتها، حيث تكون الخشنة باتجاه النهر والناعمة باتجاه البحر. وتزداد سماكة هذه الرسوبات نتيجة تراكم الطبقات المتعاقبة. وتنمو الدلتا وتتقدم تدريجياً باتجاه البحر، مشكلة سهلاً مثلث الشكل رأسه عند مصب النهر وقاعدته باتجاه البحر.

يعرف الجزء المنحدر من الدلتا والمؤلف من رسوبات خشنة بطبقات الواجهة foreset layers، والطبقات الأقل سماكة والمؤلفة من حبيبات أنعم وتغطي القاع لمساحة واسعة بطبقات القاع bottomset layers. وهكذا توضع الطبقات فوق بعضها بعضاً، وتقدم طبقات الواجهة الخشنة تدريجياً فوق طبقات القاع. ويمتد النهر تدريجياً نحو البحر فوق الدلتا المتشكلة، ويستطيل مجراه أثناء الفيضان، ويحت أعلى طبقات الواجهة ويوضع رسوباته فوق طبقات الواجهة مشكلاً طبقات القمة topset layers (شكل ٣-٣).





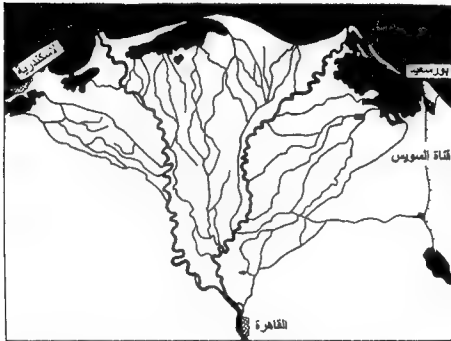
شكل ٣٠٣: رسم تخطيطي يوضح المظاهر الرئيسية للدلتا.

ومع استمرار الترسيب في الدلتا ترتص الطبقات السفلية بالوزن المتزايد فوقها، ويزداد انحدار الطبقات العلوية، مما يؤدي إلى عدم الاستقرار، وحدث انزلاقات تحت بحرية تؤدي إلى نقل المواد الرسوبية الدلتاوية إلى نطاقات بحرية عميقة، وتتوضع على مساحات كبيرة، وتدعى في هذه الحالة رسوبات العكر turbidity sediments.

يتفرع مجرى النهر عادة فوق سطح الدلتا مشكلاً عدداً من المجاري تعرف بأقنية التوزيع distributary channels، حيث تجري فيها المياه بشكل مستقل. ويعطي التوزيع الشعاعي لهذه الأقنية شكل مثلث يشبه الحرف اليوناني ( $\Delta$ ) الذي اشتق منه اسم الدلتا.

تشكل بعض الأنهار العظمى في العالم دلتات ضخمة عند دخولها في البحر. وإن لكل منها صفات مميزة تحددها عوامل مختلفة أهمها:

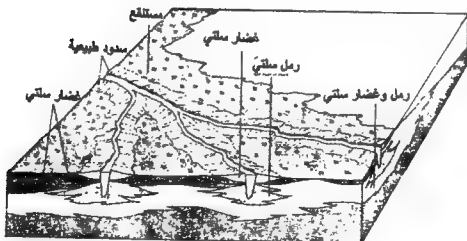
- ١- تصريف النهر.
  - ٢- صفات الحمولة.
  - ٣- شكل الشاطئ وطبيعته.
  - ٤- طبوغرافية المنطقة البعيدة عن الشاطئ.
  - ٥- شدة الأمواج والتيارات البحرية واتجاهاتها على طول الشاطئ.
- وفي جميع الأحوال تتشكل الدلتا وتتمو باتجاه البحر، إذا كانت نسبة الرسوبات تفوق نسبة المواد التي تنقل من الشاطئ.
- تعد دلتا نهر النيل ودلتا نهر الميسيسيبي من أضخم وأشهر الدلتا المعروفة في العالم. أما دلتا النيل فتتألف من مساحة مثلثة الشكل (شكل ٣-٣١) وقد أتت التسمية من شكل هذه الدلتا.



شكل ٣-٣١: دلتا نهر النيل.

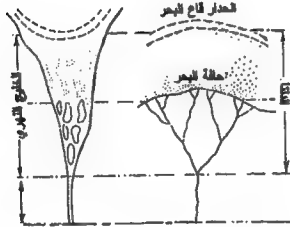
أما دلتا نهر الميسيسيبي فتتألف من عدد من أقيّة التوزيع التي تتوجه إلى خليج المكسيك، ويشبه شكلها الإجمالي رجل الطير لذلك تدعى دلتا رجل الطير *bird - foot delta*، وتتميز بمجري الأقيّة بأنها عميقة ومتطاولة في اتجاهات شبه مستقيمة، وتمتد لمسافات كبيرة في مياه خليج المكسيك (شكل ٣٢-٣)، ويعود نشوء هذه الظاهرة إلى أن المواد الخشنة التي ينقلها النهر تتوضع على طول مجري الأقيّة، بينما تتوضع المواد الناعمة حول و بين الأقيّة مشكلة حواجز غضارية شديدة التماسك على جانبي كل فرع. وقد حالت هذه الحواجز دون انخفاء هذه الفروع بوساطة الحت الجانبي، وأدت إلى حصر عمل مياه الأقيّة في تعميق وادبها بالحت الشاقولي فقط.

تغطي دلتا نهر الميسيسيبي نحو ٣١,٠٠٠ كم<sup>٢</sup> (عند الجزء المغمور بمياه البحر). وهي دلتا معقدة تشكلت من اندماج عدد من الدلتات الثانوية بنيت خلال بضعة آلاف من السنين. وقد عدلت أشكالها كثيراً بتأثير الحت الشاقولي، والهبوط التدريجي لليابسة الناجم من الثقل الهائل للرسوبات.



شكل ٣٢-٣ رسم تخطيطي يبين تشكيل دلتا نهر الميسيسيبي.

تعد الدلتا صفة مميزة لعدد من الأنهار الكبيرة، مع أن هنالك كثيراً من الأنهار ليس لها دلتا. وذلك لعدم توافر شروط الدلتا. يعد نهر الأمازون من أكبر الأنهار في العالم ولكن لم تتكون له دلتا. وفي الحالات التي لا تتوضع فيها الرسوبات عند مدخل النهر في البحر، يتشكل ما يسمى الخليج النهري Estuary (شكل ٣-٣٣). ويمكن أن يحصل حين اختلاط مياه النهر العذبة المحملة بالغضاربات، بمياه البحر المالحة تتشكل سداة موحلة بتيحة الفعل الكتروليتي لمياه البحر، الذي يؤدي إلى ندف أو تخثر المعلقات الغضارية شبه الغروية. وقد يؤدي التراكم المستمر للمواد الغضارية إلى تحول الخليج النهري إلى دلتا.

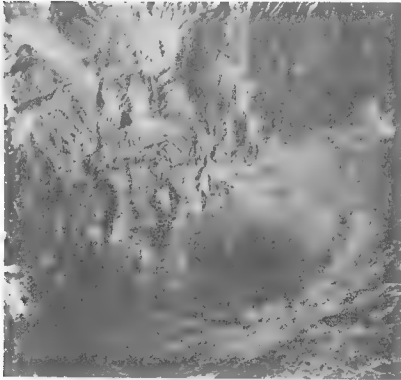


شكل ٣٣٣ يوضح حالات تشكل الدلتا والخليج النهري.

### المراوح اللحقية: Alluvial fans

إن المراوح اللحقية مشابهة للدلتات، إنما تتشكل داخل اليابسة في الأماكن التي يتغير فيها جريان الأنهار من مناطق ذات تضاريس حادة وانحدارات شديدة إلى مناطق

سهلية، حيث تنخفض سرعة تياره السائي ويُضَيِّع جزءاً كبيراً من طاقته، ويرسب الكثير من حمولته الرسوبية بشكل مروحي، ضيق باتجاه عالية النهر وواسع في اتجاه المناطق السهلية. وتتنوع المواد الرسوبية في هذه المراحل من الجلاميد الصخرية إلى الحصى والرمال وبعض المواد الناعمة. ويمكن أن تتراوح المجاري النهرية فوق المراحل اللحقية باتجاهات جانبية تجعلها تشكل مراحل جديدة. وهذا يؤدي إلى تشكل مساحات واسعة مغطاة بالمراحل اللحقية. وقد يتشعب النهر بين هذه المراحل في أقبنة متعددة تبني بدورها مراحل ثانوية متداخلة (شكل ٣-٣٤).



شكل ٣-٣٤ المراحل للحقية.

إن البروفيل الطولي للمروحة من قمتها إلى قاعدتها له الشكل نفسه للمنحني المميز للبروفيل الطولي للأنهار. ويعتمد هذا البروفيل بشكل رئيس على تصريف وحجم جزيئات particles المحمولة السريية للنهر. لذلك لا توجد مروحتان

متماثلتان تماماً. فالجري المائي الصغير الذي يحمل مواد خشنة بين مروحة أقصر وأشد انحداراً من النهر الكبير الذي يحمل مواد أنعم. وبصورة عامة تنسب مساحة المروحة إلى مساحة عالية النهر التي تشتق منها الرسوبات.

### التطور الطبوغرافي لليابسة في مناطق المجاري المائية

لقد حدد مفهوم هذا التطور من قبل العالم الجيومورفولوجي وليام ديفيس William Davis وغيره من المشتغلين في هذا المضمار، بأن التضاريس في هذه المناطق تخضع إلى تغيرات تدريجية تجري في خطوات مميزة هي مرحلة الشباب ومرحلة النضج ومرحلة الشيخوخة.

تكون التضاريس في مرحلة الشباب youth stage حادة شديدة الانحدارات، بسبب عمليات نهوض اليابسة. وتكون فيها أنظمة المجاري المائية سريعة الحركة وعالية الطاقة، بحيث تحفر أقيمتها نحو الأسفل، وتأخذ مقاطعها شكل الحرف V. ويتشكل فيها الكثير من الشلالات والمجاري السريعة بسبب عدم النظامية والتجانس في الصخور. وقد تحوي القواسم divides بين هذه المجاري منخفضة صغرة تتجمع فيها مياه راكدة مستقمية (شكل ٣-٣٥).

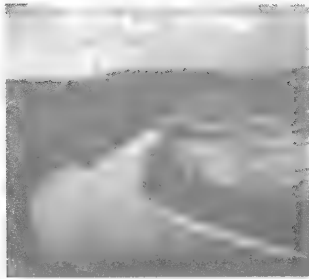
يلي مرحلة الشباب مرحلة النضج mature stage، التي تتميز بتضاؤل القواسم بين المجاري وزوال بروزاتها الصخرية الحادة، وتصبح السطوح التضاريسية أكثر تدوراً، وتأخذ المجاري المائية بتوسع أقيمتها باتجاهات جانبية، ويضعف الحث الشاقولي وتطور المنعطفات النهرية وسهول الفيضان (شكل ٣-٣٦).

أما مرحلة الشيخوخة old age فتبدأ مع استمرار اهتراء التضاريس المرتفعة، وتضاؤل طاقة التيارات المائية، ووصول عمليات الحث الشاقولي إلى حدودها الدنيا. وتصبح الأودية عريضة وواسعة، وتلاشى القواسم لتصبح التضاريس شبه متموجة. كما تتعرج الأنهار في منعطفات عديدة ومعقدة عبر سهولها اللحقية، ويكثر وجود البحيرات المنقطعة (بحيرات طوق الثور) شكل (٣-٣٧). وتنتهي هذه المرحلة بزوال التضاريس بحيث تصبح المنطقة سهلاً ممهداً penepplain، ولا يوجد في الوقت الحاضر

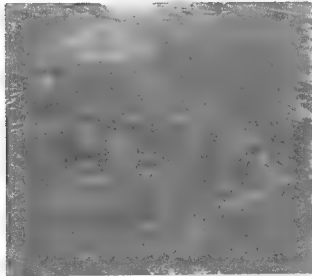
من السهول الممهدة إلا أمثلة قليلة جداً، لأن استمرار نشاط القوى الداخلية للأرض ينهض بأجزاء واسعة من القارات إلى مستويات مرتفعة، قبل أن تصل فيها الجحاري إلى الشيخوخة.



شكل ٣٥.٣: طبوغرافية لليغسة في مرحلة الشباب.



شكل ٣٦٠: طوبوغرافية الواجهة في مرحلة التضج.  
يوضح الشكل تضاريس لطيفة ومدورة ومنحطاً نهرياً عريضاً، وسهلاً لحقياً ضيقاً.



شكل ٣٧٠: طوبوغرافية الواجهة في مرحلة الشيفوخة.  
يوضح الشكل تضاريس ممهدة ومنحطات نهريّة شديدة الانضاء، وسهلاً لحقياً واسعاً. كما يوضح البحيرات المنقطعة والسدود الطبيعية (اللون الفاتح).



وهنا يمكن الإشارة إلى وجود عدد من الأمثلة عن أشكال اليابسة التي صنعتها  
البحاري المائية، والتي يمكن تحديد المرحلة التي وصلت إليها، وبالمقابل توجد أمثلة  
أخرى لا يمكن أن نحدد فيها مراحل التطور المذكورة آنفاً، وبخاصة تلك التي تقع في  
مناطق شديدة البرودة أو غزيرة الأمطار وكثيفة الغابات، أو في مناطق صحراوية  
جافة.

## الفصل الرابع

### المياه الجوفية

تعد المياه الجوفية مصدراً مهماً لتأمين الماء الضروري لحياة الإنسان والحيوان والنبات وتطور الحياة الإنسانية. وقد استعمل الإنسان المياه الجوفية منذ بداية التاريخ، وحفرت ملايين الآبار في العالم للبحث عن مصادرها واستغلالها. كما أنها تلعب دوراً كبيراً في تجوية الصخور، وبخاصة الكربوناتية، حيث يؤدي انحلالها إلى تشكل الكهوف والمغاور.

ولهذا لا بد لنا من فهمها ومعرفة جيولوجيتها، لكي نحافظ على مصادرها ونحسن استغلالها. وقد أصبحت دراسة المياه الجوفية في الوقت الحاضر علماً قائماً بذاته، تزداد أهميته سنة بعد سنة وهو علم الهيدروجيولوجيا Hydrogeology.

#### أصل المياه الجوفية Origin of ground water

المياه الجوفية هي المياه الموجودة في فراغات المهد الصخري والريغوليت. وبالرغم من ضخامة كميات المياه المخزونة فهي لا تزيد على ستة أعشار من الوَاقِد بالمائة (٠,٦٪) من مجمل المياه الموجودة بالكرة الأرضية (جدول ٣)، كما أن حجمها أكبر بـ (٣٥) مرة من حجم مياه البحيرات والأنهار الموجودة في العالم.

النسبة المئوية الحجمية	الحجم بآلاف كم <sup>٣</sup>	توزع المياه
٠,٠٠٠١	١,٢٥	الأنهار.
٠,٠٠١	١٣	الغلاف الجوي.
٠,٠٠٥	٦٧	رطوبة التربة.
٠,٠٠٩	١٢٥	مياه البحيرات العذبة.
٠,٠٠٨	١٠٤	البحيرات المالحة والبحار القارية.
٠,٦١٥	٨٣٥٠	المياه الجوفية إلى عمق (٤) كم.
٢,١٥٠	٢٩٢٠٠	الجليديات.
٩٧,٢١٢	١٣٢٠٠٠٠	المحيطات.
١٠٠,٠٠٠١	١,٣٥٧,٨٦٠	المجموع

جدول ٣ - توزيع المياه في الكرة الأرضية.

لقد شغل موضوع منشأ المياه الجوفية علماً كبيراً من الفلاسفة القدماء، وانتهوا للقول أن المصدر الرئيس للمياه الجوفية هو المياه الجوية *meteoric water*، التي تهطل على سطح الأرض على شكل أمطار وتلوج، وقسم منها يجري على سطح الأرض، وقسم منها يعود مباشرة للجو بالتبخّر، وقسم منها يتسرب تحت السطح ليكون المياه الجوفية.

وقد وجد العلماء أن الماء الخلالي *connate water* والماء البكر *juvenile water* الآتي من الأبخرة والغازات المتحررة من المعتمات والنشاطات البركانية، يساهم بنسبة ضئيلة في تكوين الماء الجوي. أما الماء الخلالي فهو الماء المتحرر أثناء تشكل الصخور الرسوبية. فأتثناء عمليات الترسيب تحتبس الرسوبات كميات كبيرة من الماء، كما تحتفظ

الصخور الرسوبية بقسم من هذا الماء ويعرف بالماء المستحاث fossil water ويتحرر القسم الآخر أثناء عمليات الدياجينيز والامتحالة ليشارك في تكوين المياه الجوفية. وعادة تكون هذه المياه حارة ومعدنية. ويعتقد العلماء أن مصدر مياه البكر يأتي بمعظمه من الماء الخلابي.

## توزع المياه الجوفية

تبلغ نسبة المياه التي تتسرب في باطن الأرض نحو  $\frac{1}{10}$  من كمية الأمطار التي تهطل على السطح. وهي تختلف حسب معدل الأمطار وطبيعة الصخور وشدة الانحدار، ففي المناطق التي يكون فيها معدل الأمطار معتدلاً، وتكون أراضيها خفيفة الانحدار تزداد نسبة المياه المرتشحة، وتصبح هذه النسبة أكبر حين تكون الصخور السطحية شديدة النفوذية، وبخاصة في حالة وجود غطاء نباتي.

تستمر المياه المتسربة في تعمقها تحت السطح حتى تصل إلى طبقات كثيفة، تؤدي إلى إيقافها وتجمعها، وتشكل طبقات حاملة للمياه aquifer layers. وبهذا يمكن أن يتحدد وجود المياه تحت السطح بالنطاقات التالية:

### ١- نطاق التهوية Aeration zone

وهو نطاق تحرك المياه، حيث تنتقل خلال فراغات وشقوق الصخور، وهي في طريقها إلى الطبقات الحاملة للماء. وتكون الفراغات مملوءة بالهواء والماء، ويمكن أن يقسم نطاق التهوية إلى ثلاثة أحزمة:

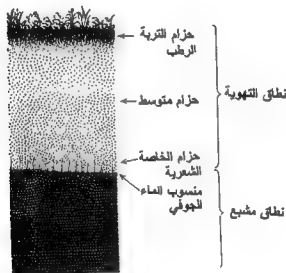
أ - حزام التربة الرطب، ب - حزام متوسط، ج - حزام الخاصة الشعرية.

أ - حزام التربة الرطب Soil moisture belt: وهو يمتد من سطح الأرض إلى نهاية جذور النباتات. ويكون جزء من الماء المتسرب في هذا الحزام معلقاً بفعل قوى الجذب الجزيئي molecular attraction التي تمنعه من التحرك باتجاه الأعماق، حيث يشكل غشاء يغلف حبيبات التربة. يُستعمل بعض هذا الماء بوساطة النباتات، وبعضه الآخر يتبخر عائداً للغلاف الجوي، أما الجزء المتبقي من الماء وغير العالق،

فيستمر في تعمقه حتى يصل إلى الطبقة الحاملة للماء، التي تعرف حدودها العليا بمنسوب الماء الجوفي.

ب - حزام متوسط **Intermediate belt**: يوجد أسفل حزام التربة الرطب وينعدم وجوده في المناطق الرطبة، التي يكون منسوب الماء فيها قريباً من السطح. بينما تصل سماكته في المناطق الجافة إلى نحو (٥٠٠) متر. وتكون المياه في هذا المستوى إما معلقة بالجاذب الجزئي، أو من النوع المتحرك ليصل إلى الطبقة الحاملة للماء.

ج - حزام الخاصة الشعرية **Capillary fringe belt**: يفصل هذا الحزام بين نطاق التهوية ونطاق التشبع. حيث يرتفع الماء في هذا الحزام في اتجاه معاكس للثقالة في مسارات شعرية دقيقة بين حبيبات التربة أو الرسوبات. وتختلف سماكة هذا الحزام حسب طبيعة الرسوبات التي تتحرك فيها المياه. ففي حالة رسوبات خشنة تكون سماكته ضئيلة جداً بينما تصل إلى عدة أمتار في الرسوبات الناعمة (شكل ٤-١).



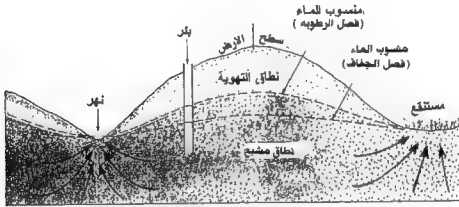
شكل ١-٤: توزيع المياه الجوفية.

## ٢- نطاق متوسط Intermediate zone

ينحصر هذا النطاق بين أعلى منسوب تصل إليه المياه الجوفية بعد فترات الأمطار الغزيرة، وأدنى منسوب تهبط إليه في نهاية فترة الجفاف. وهذا يعني أنه قد حفر آبار في هذا النطاق فلا بد أن تكون موسمية وليست دائمة.

## ٣- نطاق التشبع Saturation zone

تكون الفراغات في هذا النطاق مملوءة بالماء الجوفي، حيث يمنع تسربها إلى باطن الأرض وجود طبقة كثيفة تحته. وعادة تكون الآبار التي تحفر في هذا النطاق دائسة التصريف (شكل ٤-٢). وسوف نركز في هذا الفصل على دراسة الماء الجوفي في هذا النطاق.



شكل ٤-٢: يوضح نطاقات المياه الجوفية في الأراضي المتجانسة.

## عمق المياه الجوفية

توجد المياه الجوفية على أعماق مختلفة تحت سطح الأرض ففي المناطق الرطبة توجد على عمق بضعة أمتار من السطح، بينما تكون في المناطق الصحراوية على

المسوق بفتح ميم من الأمتار.

و بصورة عامة يوجد الماء الجوفي تحت سطح اليابسة في كل مكان تقريباً، إلا أن وجوده بكميات قابلة للاستثمار يعتمد على الصخور الحاملة له وتنوعيتها، كما يعتمد على أنواع وكميات المواد المتحللة فيه، ولهذا السبب فإن بعض الأماكن تكون مناسبة أكثر من غيرها للحصول على إمداد مفيد من الماء الجوفي.

إن أكثر من نصف الماء الجوفي، بما فيه معظم الماء القابل للاستثمار موجود في أعماق تقرب من (٧٥٠) متراً من سطح الأرض. ويبلغ حجم الماء الجوفي في هذا النطاق العميق بما يعادل طبقة مائية تفرش جميع مساحات اليابسة في العالم بسماكة (٥٥) متراً. ثم يتناقص وجود الماء الجوفي بعد هذا العمق تدريجياً وبشكل غير نظامي. وقد عثر بعض علماء السوفيت على مياه جوفية على أعماق ٩,٤ كم و ١١ كم. ولكن المياه في هذه الأعماق تكون واقعة تحت ضغوط عالية ناجمة من الغطاء الصخري، مما يؤدي إلى احتباس المياه في الفراغات الصخرية الصغيرة، ويصبح من الصعب الحصول عليها.

### منسوب الماء الجوفي Ground water table

توجد المياه الجوفية تحت سطح الأرض على مستوى معين يعرف بمنسوب الماء الجوفي، وهو السطح العلوي لنطاق التشبع. ويختلف عمق هذا المنسوب من مكان لآخر. فهو يكون قريباً من سطح الأرض في المناطق الرطبة غزيرة الأمطار، والقرية من البحار والأنهار، بينما يكون بعيداً عن سطح الأرض في المناطق الجافة. ويساير منسوب الماء الجوفي السطح الطبوغرافي من حيث الارتفاع والانخفاض، إذ يتوازي مع السطح الطبوغرافي حين تكون الأراضي منبسطة، ويكون أقل مسaire في المناطق ذات التضاريس الحادة (شكل ٤-٣).



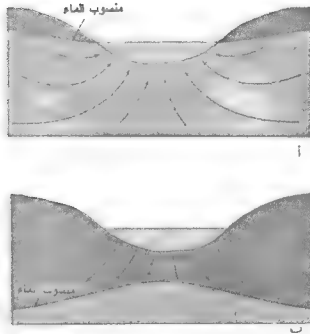
شكل ٤-٣: مقارنة مستوى الماء الجوفي للسطح للطوبوغرافي.

**العوامل المؤثرة في منسوب الماء الجوفي:** تشترك عدة عوامل في جعل سطح منسوب الماء الجوفي غير منتظم، مثل الاختلاف في معدل الأمطار ونفوذية الصخور من مكان إلى آخر، حيث يؤدي ذلك إلى ارتشاح غير متساوٍ للماء، وبالتالي إلى اختلافات في مستوى الماء الجوفي. وعلى كل الأحوال فإن السبب المهم في عدم الانتظام هو تحرك المياه الجوفية ببطء شديد، وبمعدلات متغيرة تحت شروط مختلفة. وبذلك تميل المياه الجوفية إلى التجمع تحت المناطق المرتفعة الواقعة بين الأودية النهرية. فإذا توقف هطول المطر كلياً فإن هذا الارتفاع في مستوى الماء سوف يهبط تدريجياً ليصل إلى مستوى الأودية، ولكن هذا لا يحدث لأن الامداد المطري الجديد وبشكل متكرر يحول دون ذلك.

كذلك وجود قناة نهرية فوق نطاق التشبع يؤثر في منسوب الماء الجوفي. ففي المناطق الرطبة غزيرة الأمطار يرتفع منسوب الماء، ويتقاطع مع القناة النهرية، ويتم امدادها وبشكل مستمر بالمياه الجوفية، وتعرف هذه الأنهار بالمتأثرة *effluent streams*. وبالمقابل ففي المناطق الجافة يكون منسوب الماء الجوفي بعيداً عن السطح، فإن الأنهار دائمة الجريان الآتية من المناطق الممطرة، عندما تعبر الصحاري فإن تفقد كميات من مياهها في تغذية نطاق التشبع الواقع تحتها، نتيجة تسربها إلى الأسفل،



مما يؤدي إلى تحذب في منسوب الماء نحو الأعلى تحت القناة النهرية. ويشار إليها في هذه الحالة بالأبهار المؤثرة influent streams (شكل ٤-٤).



شكل ٤-٤: علاقة منسوب الماء الجوفي بالشروط المنطقية.

أ - في المناطق الرطبة ينحدر منسوب الماء الجوفي باتجاه النهر (نهر مؤثر).

ب - في المناطق الجافة يرتفع منسوب الماء الجوفي تحت القناة النهرية (نهر مؤثر).

## المسامية والنفوذية

تكون معظم المياه الجوفية الموجودة على أعماق مختلفة من سطح الأرض في حركة مستمرة، وتقاس سرعة تحركها بالسنتيمتر في اليوم، أو المتر في السنة. ولا بد لنا لفهم بقاء حركة المياه الجوفية من دراسة الخواص الفيزيائية للصخور، وعلاقتها بحركة المياه

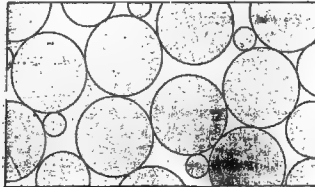
## الجوفية.

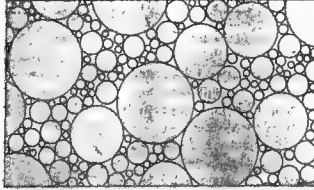
تقسم الصخور اعتماداً على علاقاتها بحركة المياه الجوفية إلى نوعين رئيسين: النوع الأول يسمح بتسرب المياه عبر المسامات والفراغات، التي توجد بين الحبيبات المكونة للصخور، أو خلال الشقوق والفواصل الموجودة فيها، ويعرف هذا النوع بالصخور النفوذة كالصخور الرملية والحصى قليلة التماسك، والصخور البلورية المشققة. أما النوع الثاني فلا يسمح بتسرب المياه ونفاذها إلى باطن الأرض. ويعرف بالصخور الكمية كالصخور الغضارية والصخور البلورية غير المشققة. ويجب هنا أن نميز ما بين مسامية الصخر ونفوذيته.

**المسامية porosity:** تعتمد كمية المياه المخزونة ضمن حجم معين من الصخر أو الرسوبات على المسامية. وتحسب المسامية بالنسبة المئوية لحجم الفراغات إلى الحجم الكلي للصخر أو الرسوبات الحاوية لها.

تختلف المسامية اختلافاً كبيراً حسب نوعية الصخور، حيث تتميز الصخور الرسوبية الحطامية عن غيرها من الصخور الرسوبية أو الصخور النارية بمساميتها العالية، إذ إن الحبيبات الحطامية حين تتراكم بالتسريب لا بد أن تترك بينها فراغات مسامية. وتعتمد المسامية فيها على شكل وحجم الحبيبات المكونة للصخور ودرجة تجانسها، كما تعتمد على طريقة ارتصافها.

تزداد المسامية مع تناقص حجم الحبيبات، إذ ترتفع المسامية إلى نحو ٥٤٪ في الرسوبات الغضارية، بينما تنخفض في الرسوبات الرملية الخشنة إلى نحو ٣٩٪. وكذلك التجانس الحجمي يرفع من درجة المسامية بينما تنخفض حين تكون الحبيبات متباينة في الحجم (شكل ٥-٤).

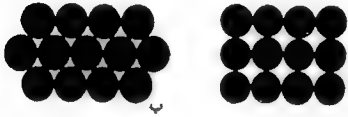




ب

شكل ٥-٤: رسم توضيحي يبين علاقة المسامية بالتجانس الحجمي (تمثل الحبات الرسوبية بالشكال كروية)  
 أ - المسامية ٣٢٪ في حالة تجانس حجم الحبات.  
 ب - للمسامية ١٧٪ في حالة عدم تجانس حجم الحبات.

أما ارتصاف الحبات الحطامية إلى جانب بعضها بعضاً، فهو ذو تأثير في المسامية. ففي مجموعة من الحبات الكروية المتعادلة في الحجم يمكن للمسامية أن تتراوح بين ٢٦ - ٤٨٪، حسب النموذج الذي يتم فيه إرتصافها (شكل ٦-٤).

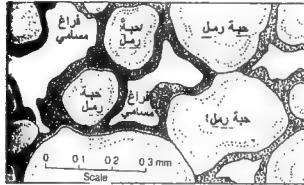


ب

أ

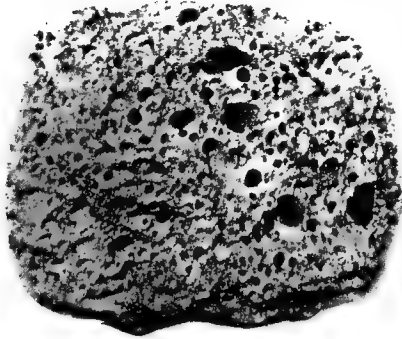
شكل ٦-٤: رسم توضيحي يبين تأثير طريقة إرتصاف الحبات في المسامية.  
 أ - الارتصاف التلق: تكون كل كرة على تماس مع ست كرات أخرى (في الأبعاد الثلاثة) وتكون المسامية ٤٧,٦٪.  
 ب - الارتصاف الممتقر: تكون كل كرة على تماس مع اثنتي عشرة كرة أخرى وتتنخفض المسامية إلى ٢٦٪.

كذلك يؤثر شكل الحبات في المسامية. فالحبات جيدة التدوير تميل لأن ترتصف بفراغات دنيا أكثر من الحبات الزاوية. وبصورة عامة إن مسامية الرسوبات تنخفض بنسبة كبيرة إذا ما تماسكت بملاط ما شكل (٧-٤).



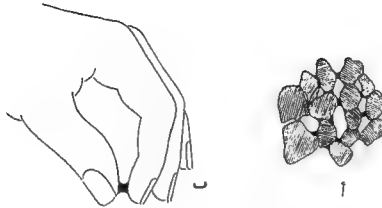
شكل ٧-٤: انخفاض المسامية بتماسك حبات الرمل بالملاط.

أما مسامية الصخور البركانية فتراجع إلى انطلاق الغازات البركانية أثناء تصلب اللابات، حيث تخلف في الصخور الناتجة منها فراغات كروية، تختلف في حجمها وعددها من صخر لآخر، وتعرف بالمسامية الفقاعية (vesicular porosity) (شكل ٨-٤). وبصورة عامة ترجع مسامية الصخور النارية إلى الشقوق والفواصل التي أوجدتها الأحداث التكوينية وهي مسامية الشقوق (fracture porosity). ويضاف إلى ذلك تشكل المسامية في الصخور بعمليات الانحلال الكيميائي وتعرف بمسامية الانحلال (solution porosity).



شكل ٨-٤: المسامية للفقاعية في صخر الخلطان البركاني.

**النفاذية Permeability:** النفاذية هي قابلية الصخور على إمرار الموائع خلال الفراغات الموجودة فيها. ومن المحتمل أن يكون الصخر ذو المسامية المنخفضة ذا نفاذية منخفضة، ولكن ليس من الضروري أن تكون المسامية عالية حتى تكون النفاذية عالية. لأن النفاذية تعتمد على أبعاد الفراغات وحجومها واتصالها مع بعضها البعض، ويلعب الجذب الجزيئي molecular attraction دوراً مهماً في النفاذية. فالجذب الجزيئي هو القوة التي تجعل غشاوة مائية تلتصق بالسطح الصخري على الرغم من قوة النقاة. ومثال ذلك إذا غطسنا الحصى في الماء ثم أخرجناه. فإذا كان الفراغ المسامي pore space بين حبتين متجاورتين صغيراً، فإن الغشاوتين المائيتين لهاتين الحبتين تلتصقان مع بعضهما بعضاً، وتمتد قوة التجاذب الجزيئي داخل الفراغ المسامي وتمنع الماء من الحركة (شكل ٩-٤).

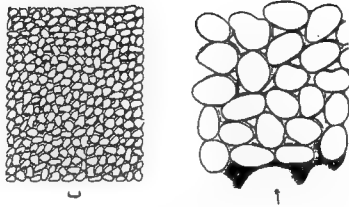


شكل ٩-٤: يوضح الجذب الجزئي.

أ - الماء المعلق ما بين حبات رمولة.

ب - الماء المعلق ما بين الإبهام والسبابة.

وهذا ما يحدث في الصخور الغضارية، فبالرغم من أنها ذات مسامية عالية لكنها غير نفوذة. وهذا بسبب كونها مؤلفة من فلزات مقاييس حبيباتها أقل من (٠,٠٥ مم)، والفراغات المسامية بينها صغيرة جداً. وتكون المياه الموجودة ضمن المسامات مرتبطة فيزيائياً بشكل متين، بحيث لا تستطيع قوى الثقالة تحريكها، وبالتالي لا تستطيع المياه الحركة بين الفراغات. وبالمقابل فإن الرسوبات الرملية مؤلفة من حبات مقاييسها بين (٠,٠٦ - ٢ مم)، وإن قطر الفراغات المسامية أكبر من سماكة الغشاوة المائية التي تغلف الحبات، لذلك لا تمتد قوة الجذب الجزئي خارج نطاق الغشاوة، مما يسمح بتحريك الماء في مراكز هذه الفراغات بحرية تجاوباً للثقالة الأرضية. وكلما كانت أقطار الفراغات المسامية كبيرة ازدادت النفوذية، على أن تكون هذه الفراغات متصلة (شكل ٤-١٠).



شكل ١: تأثير الجذب الجزيئي في ماء الفراغات المسامية للرسيوبت.

أ - يرتشح الماء إلى الأسفل في الرسيوبات الرملية، بالرغم من أن بعض الماء يبقى معلقاً بالجذب الجزيئي.

ب - يبقى الماء معلقاً في الفراغات المسامية في الرسيوبات الناعمة. (مقياس الرسم أكبر بكثير من الحجم الطبيعي).

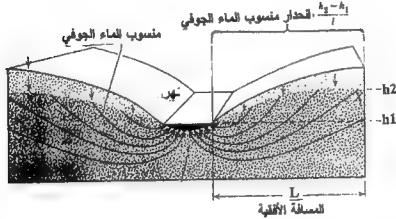
تكون الصخور النفوذة قابلة لحمل المياه الجوفية واختزانها، إذا كانت مرتكزة فوق طبقات كثيفة، لذلك تعرف بالصخور الحاملة للماء aquifer rocks مثل الصخور الحطامية قليلة التماسك (صخور حصوية أو رملية) والصخور الكلسية المكروستة، والصخور النارية (غرانيت - بازلت - غابرو) المشققة.

### حركة المياه الجوفية:

تسمى حركة المياه الجوفية داخل نطاق التشبع الارتشاح percolation، إذ يتحرك الماء ببطء خلال فراغات مسامية صغيرة على امتداد ممرات خيطية الشكل ومتوازية. تعرف هذه الحركة بالتدفق الصفائحي laminar flow. حيث تكون الحركة في مراكز هذه الممرات سريعة، ثم تتناقص تدريجياً باتجاه جدران الفراغات، حتى تصل إلى الصفر بسبب قوى الجذب الجزيئي.

تستمد الطاقة التي تسبب ارتشاح المياه الجوفية من قوة الثقالة الأرضية، ويكون

رد فعل لهذه القوة ارتشاح المياه من أماكن ذات منسوب مائي عالٍ إلى أماكن ذات منسوب مائي منخفض، في اتجاه مجرى مائي أو بحيرة أو ينبوع (شكل ١٤-١).



شكل ١٤-١: حركة المياه الجوفية في الصفوح النفاذة.

يلاحظ من الشكل أن بعض الماء الجوفي يجري مباشرة باتجاه أسفل منحدر المنسوب المائي بأقصر طريق ممكن. غير أن معظم الماء يجري على امتداد ممرات عديدة ومنحنية متجهة نحو الأعماق. ويتحول بعض هذه الممرات العميقة نحو الأعلى باتجاه عكس الثقالة الأرضية، وينفذ الماء إلى المجرى المائي من كل الاتجاهات. بما فيها الاتجاه الشاقولي ويحدث هذا لأن المياه الجوفية في أسفل المرتفعات تكون واقعة تحت ضغوط أعلى مما عليه تحت المجرى المائي أو البحيرة، مما يدفعها للتحرك تجاه منطقة الضغط المنخفض.

وهكذا فإن القوة التي تسبب حركة الماء الجوفي منسوبة للثقالة الأرضية، التي تسحب الماء باتجاه الأسفل، ثم ينحرف جانبياً في اتجاه نقطة التصريف (نهرًا - بحيرة - ينبوعاً) التي تكون على منحدر. يسمى انحدار منسوب الماء الجوفي التحدر المائي ( $I$ ) - hydraulic gradient. ويحسب بقسمة البعد الرأسى ( $h$ ) بين نقطة التدفق ونقطة التصريف على المسافة الأفقية بين النقطتين ( $L$ ) أي:



$$I = \frac{h}{L}$$

ففي عام ١٨٥٦ افترض مهندس فرنسي يدعى هنري دارسي Henri Darcy صيغة، يمكن أن تستعمل للتعبير عن معدل سرعة جريان الماء الجوي عبر الصخور، وتعرف الآن بقانون دارسي ويعبر عنها بالمعادلة التالية:

$$V = p \cdot \frac{h}{L} = p \cdot I$$

حيث تمثل ( $V$ ) السرعة و ( $p$ ) عامل النفوذية. وقد وجد دارسي أن سرعة الماء الجوي تزداد بازدياد التحدّر المائي إذا ما ثبت عامل النفوذية.

ونظراً لكمية الاحتكاك الكبيرة التي تؤثر في ارتشاح المياه، فإن معدل سرعة تدفق الماء الجوي يكون منخفضاً، ويقارح عادة ما بين بضعة سنتيمترات في اليوم إلى نحو (١٥) ممراً في السنة. وقد تم قياس أكبر معدل لحركة الماء الجوي في الولايات المتحدة، فكان (٢٥٠) ممراً في السنة في صخور ذات نفوذية عالية جداً.

وقد أجري حساب لمعدل سرعة الماء الجوي المرتشح ما بين أزواج من الآبار بطرائق مباشرة عديدة، نذكر منها الطريقة التي تعتمد على الناقلية الكهربائية. وتتضمن الوصل بين بئرين متجاورتين مكسوتين من داخلهما بمعدن ليشكلا دائرة كهربائية، وقد أضيفت إلى مياه البئر عالية المنسوب مركبات كيميائية ذات ناقلية فعالة، وعند وصول هذه المركبات إلى البئر الثانية ذات المنسوب المنخفض، تشكلت دائرة مغلقة بين البئرين التي سجلت تغيراتها بوساطة مقياس الكمون. ويتقسيم المسافة بين البئرين على الفقرة الزمنية، التي استغرقتها المركبات الكيميائية للوصول إلى البئر الثانية، تحدد سرعة تدفق الماء الجوي. وقد استعملت في طريقة أخرى مواد ملونة، التي تضاف إلى إحدى الآبار، ثم يحسب الزمن اللازم لانتقالها إلى بئر أخرى مجاورة تقع على بعد معلوم.

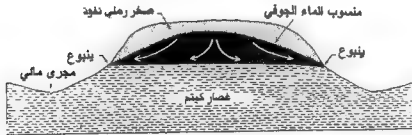
وقد بينت القياسات، التي سجلت في عدد كبير من التجارب، بأن سرعة تدفق الماء الجوي في الطبقات الحاملة للماء ليست أكثر من (١,٥) ممراً في اليوم، ولا أقل من (١,٥) ممراً في السنة.

## الينابيع

وهي الفتحات التي يتدفق منها الماء الجوفي بشكل طبيعي على سطح الأرض. وإن أبسط أنواع الينابيع هي التي تتدفق مياهها بالنقالة الأرضية وتدعى ينابيع الثقالة gravity springs. وهي ناجمة من تقاطع منسوب الماء الجوفي مع سطح الأرض. ويتحكم في موضع ينبوع، التغير الرأسي أو الأفقي في نفوذية الصخور. فإذا كانت طبقات رملية مسامية تقع فوق طبقة كتيمة، فإن الماء المرتشح داخل الطبقات الرملية، سوف يتحرك جانبياً حين اصطدامه بالطبقة الكتيمة، وقد ينبثق على شكل ينبوع حين يوجد تماس سترايتفراي متكشف على سطح الأرض على امتداد جانب من وادٍ أو حفرٍ شاطئي. وقد تكون الينابيع متقطعة أو دائمة التدفق، وذلك حسب الفصول ومعدل الأمطار من جهة، والشروط تحت سطح الأرض من جهة ثانية.

الشروط الجيولوجية لتشكل الينابيع: تتشكل الينابيع في شروط جيولوجية يمكن إيجازها بما يلي:

١- عندما تكون هضبة مؤلفة من صخور نفوذة وتحوي في أسفلها على طبقة كتيمة أفقية، يتشكل الينبوع عندما يتقاطع منسوب الماء مع المنحدر (شكل ٤-١٢).



شكل ٤-١٢: تتشكل الينبوع عند تقاطع منسوب الماء الجوفي مع سطح منحدر.

٢- عندما توجد طبقة كثيفة فوق منسوب الماء الجوفي، فإن جزءاً من الماء المتسرب من السطح إلى باطن الأرض تعاق حركته بهذه الطبقة، مما يؤدي إلى تجمع الماء الجوفي فوقها ويشكل نطاقاً مشبعاً في نطاق التهوية. ويكون مستوى الماء في هذا النطاق أعلى من منسوب الماء الجوفي في المنطقة، لذلك يدعى المنسوب المائي المعلق perched water table ومن الممكن أن يثبت الماء الجوفي المعلق على سطح الأرض على شكل ينبوع كما هو واضح (الشكل ١٢-٤).



شكل ١٢-٤: تقاطع منسوب الماء المعلق مع سطح المنحدر يؤدي إلى تكافؤ ينبوع.

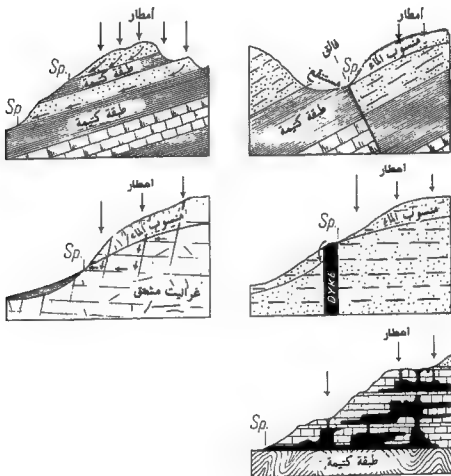
٣- عندما تتبع المياه الجوفية في حركتها ميل طبقة كثيفة، فإن هذه المياه تتدفق على شكل ينبوع في أسفل المنحدر عند حافة هذه الطبقة (شكل ١٤-٤ أ).

٤- إذا تأثرت الطبقة الحاملة للماء بفالق يجعل الطبقة الكثيفة إلى جانب الطبقة المنفذة، وتعمل على حجز المياه ورفع منسوبها. تتدفق الينابيع عند تقاطع الفالق مع منسوب الماء الجوفي (شكل ١٤-٤ ب).

٥- تتجمع المياه الجوفية في الصخور النارية على طول الشقوق الموجودة فيها، وتخرج إلى السطح على شكل ينبوع في أسفل المنحدر تحت غطاء من اللحيقيات (شكل ١٤-٤ ج).

٦- يعمل القاطع الناري dyke دور سد في طريق حركة المياه الجوفية مما يؤدي إلى تجمعها خلفه، وتدفقها على شكل ينبوع، عند تقاطع منسوب الماء الجوفي مع تكشف القاطع (شكل ١٤-٤د).

٧- تتسرب مياه الأمطار خلال شقوق وفواصل الصخور الكلسية. ثم لا تلبث الشقوق والفواصل أن تتسع بالتحرك الكارستي وتشكل الكهوف والمغاور والنجاري الجوفية، فعندما تصل إلى طبقات كريمة تخرج على شكل ينبوع عند أسفل المنحدر (شكل ١٤-٤هـ).



شكل ١٤-٤: يوضح الشروط الجيولوجية لتشكل الينابيع.

وقد يتعمق سير المياه داخل الصخور الكلسية بوجود بعض ظواهر الحث الكارستي كالمصبات، التي تعطي ينابيع متقطعة بالرغم من أن التغذية مستمرة، ومثالها نبع الفوار في وادي النضارة (الطرف الجنوبي لسلسلة الجبال الساحلية).

تبدي معظم الينابيع تغيرات في معدل التدفق. فبعضها له تغيرات موسمية حسب معدلات الأمطار، وبعضها له تغيرات يومية حسب استهلاك النباتات للماء الجوي، حيث يكون التدفق أعظمياً ما بين منتصف الليل إلى شروق الشمس، ثم يتناقص تدريجياً وبشكل ثابت مع ازدياد استهلاك النباتات للماء خلال ساعات النهار.

**الينابيع الحارة Hot springs:** تعرف الينابيع التي تنبثق منها مياه ساخنة أو حارة على سطح الأرض بالينابيع الحارة. وتعد الينابيع حارة إذا كانت درجة حرارتها أعلى بـ (٦-٩)° مئوية من حرارة الهواء الجوي في منطقة وجودها. وهي كثيرة الانتشار في مناطق مختلفة من العالم، وبخاصة في المناطق الجبلية الغربية للولايات المتحدة، ويرجع ارتفاع درجة حرارة بعضها إلى تدرج الحرارة الأرضية، إذ إن المياه السطحية المتسربة إلى ما تحت السطح ترتفع درجة حرارتها بازدياد العمق بمعدل (٣٠)° مئوية في كل كيلومتر. غير أن نحو ٩٥٪ من ينابيع الولايات المتحدة تستمد حرارتها من تبرد كتل magma التي اندست في صخور القشرة الأرضية.

تكون مياه الينابيع الحارة معدنية أكثر من غيرها. ويرجع هذا إلى كون قدرة المياه الحارة على إذابة المواد الملوقة للصخور أكثر منها في المياه الباردة. فإذا احترقت هذه المياه صخوراً كلسية فإنها تذيب قسماً كبيراً منها مشكلة مياه كلسية. أما إذا احترقت طبقات تحتري على مركبات حديدية أو كبريتية فتصبح مياه حديدية أو كبريتية. ولهذا نجد أن معظم الينابيع الحارة تكون كبريتية أو سيليسية أو كلسية، وقد يحتوي بعضها على أملاح الكلور والمغنيزيوم.

**الجييزرات Geysers<sup>(١)</sup>:** الجييزرات هي ينابيع حارة فوارة ومتقطعة، ينلغ منها بقوة أعمدة من الماء والبخار الحار، قد يصل ارتفاعها في بعض الحالات إلى أكثر

(١) أتت التسمية من كلمة Geysir وهو اسم أيسلندي ويعني التفجر.

من (١٠٠) متر. أشهرها موجودة في ثلاث مناطق بركانية وهي: جيزرات الحديقة الوطنية في منطقة اليلوستون Yellowstone في الولايات المتحدة، وفي شمال جزيرة نيوزلندا وفي آيسلندا.

إن أكبر الجيزرات المعروفة موجود في آيسلندا، حيث يظهر على شكل رابية ناجمة من توضعات المياه الحارة، تحيط بحوض دائري قطره (٢١) متراً وعمقه (١,٢) متراً مملوءاً بالمياه السيليسية، التي تتراوح درجة حرارتها بين (٧٥-٩٠) مئوية. ويتصل الحوض بمدخنة عمقها نحو (٣٠) متراً، يمر منها الماء المندفِع من الأعماق إلى السطح (شكل ١٥٤).



شكل ١٥٤: انفِعاغ مياه الجيزر في آيسلندا.

بالرغم من أننا لا نستطيع أن نلاحظ وندرس ممرات المياه الجوفية التي تزود الجزيرات. إلا أنه من المعروف أن المياه الجوفية المتسربة إلى الأعماق تتجمع في تجاويف وممرات شاقولية تصل إلى سطح الأرض، وإن الدسيسات النارية الحارة أو الغازات المنبعثة منها ترفع درجة حرارتها إلى أعلى من درجة الغليان، وتكون درجة غليان المياه السفلية أعلى من (١٠٠°) مئوية بسبب ضغط المياه العلوية. وبنتيجة التسخين يتمدد الماء ومن ثم ينساب على السطح، وهذا يؤدي إلى انخفاض الضغط على المياه السفلية وحدوث الغليان، فتتجمع الغازات وبخار الماء الناجم عن التكاثف على سطح المياه، بسبب خفة وزنها، وتؤدي إلى قوى دفع كبيرة ترفع كتلة الماء إلى السطح على هيئة بخار، مما يتسبب في فورانها وتفجرها. ويرافق اندفاع بخار الماء كمية كبيرة من الغازات. وبعد ذلك تحتاج التجاويف المائية الجوفية إلى فترة معينة من الزمن لتملأ ثانية، وهكذا تعاود الاندفاعات نشاطها في فترات متقطعة (شكل ٤-١٦).

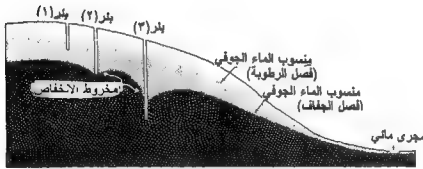
## الآبار:

عرفنا الينابيع بأنها نتيجة طبيعية لتقاطع منسوب الماء الجوفي مع سطح الأرض على أحد المنحدرات. أما الآبار فهي فتحات اصطناعية يتم حفرها ابتداءً من سطح الأرض إلى نطاق التشبع.

يختلف مستوى منسوب الماء الجوفي في الآبار باختلاف الفصول، فيرتفع في فصول الأمطار وينخفض في فترات الجفاف. ولهذا يفضل أن تكون نهاية الحفر تحت منسوب الماء الجوفي لتضمن استمرار إنتاج الماء.

حين تضخ المياه الجوفية من بئر ما، فإن منسوب الماء الجوفي ينخفض حول البئر ويشكل منحدرًا مركزه البئر، لأن مقدار الماء المسحوب من البئر أكبر من مقدار الماء الآتي إليه، وكنتيمة لذلك يأخذ منسوب الماء شكل مخروط مقلوب يدعى بمخروط الانخفاض cone of depression (شكل ٤-١٧). وبما أن مخروط الانخفاض يزيد من التحدر المائي بالقرب من البئر، فإن المياه تتدفق بسرعة أكبر نحو فتحة البئر. فإذا توقف الضخ بعد فترة قصيرة فإن منسوب الماء الجوفي يعود إلى

وضعه الأصلي. أما إذا استمر الضخ بشكل متواصل ولفترات طويلة، فإن مخروط الانخفاض يتسع جانبياً لمسافات طويلة، وينخفض منسوب الماء في المنطقة، وتصبح عودته إلى مستواه الطبيعي بحاجة لفترة طويلة، ويمكن أن يسبب ذلك جفاف الآبار الضحلة المجاورة. ويحدث ذلك أيضاً نتيجة الضخ الجائر من عدة آبار متقاربة، فيتشكل حولها عدد من مخاريط الانخفاض المتداخلة، وينخفض منسوب الماء الجوفي بسرعة ملحوظة. وهذا يتطلب منا مراقبة وتنظيم الضخ من الآبار، وتحديد الأبعاد ما بين الآبار، ليتسنى لنا الاستفادة من المياه الجوفية على الوجه الصحيح.



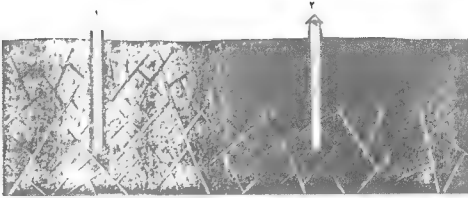
شكل ١٧-٤: تشكل مخروط الانخفاض حين ضخ المياه الجوفية.

إن حفر الآبار المنتجة للمياه تمثل مشكلة معروفة في المناطق التي تعتمد على المياه الجوفية. فقد تكون حفرة بثرية منتجة على عمق نحو (١٠) أمتار، بينما تكون في بئر مجاورة غير منتجة على العمق نفسه. ويمكن تعليل ذلك بأن الحفر في البئر الأولى قد وصل إلى مياه جوفية معلقة، بينما الحفر في البئر الثانية قد وصل إلى نطاق التهوية فقط، ويحتاج ذلك إلى حفر أعمق حتى يصل إلى منسوب الماء الجوفي الرئيس كما هو واضح في الشكل (٤-١٣).

وتصادف أحياناً الصعوبات نفسها عند حفر الآبار في الصخور البلورية. إذ إن



وجود الماء فيها يكون محصوراً في الشقوق. وإن حفر الآبار في مثل هذه الأراضي  
يعتمد على الصدفة في اختراق شبكة كافية من التشققات الصخرية (شكل ٤-١٨).  
ويمكن أن يؤدي الحفر العميق في هذه الصخور إلى بئر غير منتجة، لأن حجم  
الشقوق وعددها يتناقص مع العمق.



شكل ٤-١٨: رسم توضيحي يبين المياه الجوفية في الصخور البلورية.  
البئر (١) غير منتجة بينما تكون البئر (٢) منتجة للماء بسبب إختراق الحفر شبكة من الشقوق.

عندما تحفر الآبار في الأراضي الكلسية، حيث توجد المياه ضمن جيوب  
وممرات كبيرة، فهي تعطي كميات ضخمة من المياه، ويحتمل أن تنقطع من وقت  
لآخر، وذلك بسبب حركة المياه السريعة ضمن الجيوب.

**حساب تصريف Discharge الآبار:** يعرف تصريف البئر بكمية المياه المتدفقة  
من خلال مقطع عرضي في واحدة الزمن، وتحدد بمساحة المقطع العرضي وسرعة  
تدفق الماء فيكون:

$$V = \frac{Q}{A} \quad \text{أو} \quad Q = V \cdot A$$

حيث:  $V$  سرعة تدفق الماء.

$Q$  كمية المياه المتدفقة في واحدة الزمن.

$A$  مساحة المقطع العرضي الذي يمر خلاله الماء.

ويتطابق قانون دارسي:

$$V = p \cdot I \quad \text{يكون}$$

$$Q = p \cdot I \cdot A \quad \text{أي} \quad V = p \cdot I = \frac{Q}{A}$$

وبهذا نستطيع أن نحسب تصريف بئر ما، إذا عرفنا عامل النفوذية ( $p$ )،  
والتحدر المائي ( $I$ ) ومساحة المقطع العرضي ( $A$ ).

**الآبار الارتوازية Artesian wells<sup>(١)</sup>:** لقد استعمل كثير من الناس خطأ مصطلح الآبار الارتوازية للدلالة على الآبار العميقة. ويعتقد آخرون بأن الماء في البئر الارتوازية يجب أن يتدفق على السطح. ومع أن المعنى الثاني أكثر صحة من الأول، إلا أنه يمثل تعريفاً ضيقاً جداً. إذ أن مصطلح ارتوازي يمكن استعماله لكل حالة يرتفع فيها الماء الجوفي الواقع تحت ضغط أعلى من الضغط الجوي ليصل إلى فوق منسوب الماء الجوفي في الطبقة الحاملة للماء. وحيث يوجد نظام ارتوازي يجب أن تتوفر الشروط التالية:

١- أن تقع الطبقة الحاملة للماء (أو الخازنة للماء) بين طبقتين كئيمتين ضمن طبقة التوائية مقعرة، بحيث لا تسمح بحركة الماء إلى الأعلى أو الأسفل.

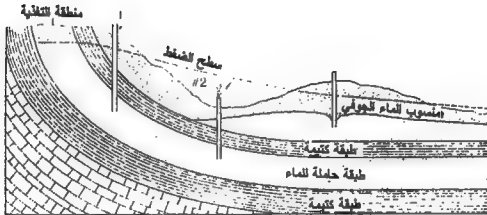
٢- أن يكون للطبقة الحاملة للماء تكشف مرتفع ليوفر ضغطاً كبيراً عند حفر البئر.

٣- توافر تغذية مستمرة بحيث تساعد على الامداد بالمياه الكافية.

٤- أن يبقى الماء محفوفاً في الطبقة الحاملة للماء، وأن لا يخرج إلا عن طريق البئر الارتوازية (شكل ٤-١٩).

(١) مهيت بالارتوازية نسبة إلى بلدة Artois في فرنسا.

فإذا حُفرت بئر في وسط انحناء المقعر، فإن الماء في هذه الحالة يصعد إلى سطح الأرض بقوة هيدروستاتيكية hydrostatic، لكي تعادل منسوب الماء في الجزء المرتفع من الطبقة الحاملة للماء (منطقة التغذية recharge area). ولكن منسوب الماء في البئر المنخفضة يرتفع إلى مستوى أقل من مستوى منطقة التغذية، بسبب قوة الاحتكاك عبر الطبقة الحاملة للماء، وفي هذا المستوى يتعادل الضغط الهيدروستاتيكي مع الضغط الجوي ويعرف بـ سطح الضغط pressure surface. وبصورة عامة كلما ازدادت المسافة من منطقة التغذية قل ارتفاع الماء. ففي الشكل (١٩-٤) فإن البئر (١) هي بئر ارتوازية غير متدفقة لأن سطح الضغط تحت سطح الأرض، بينما في البئر (٢) هي بئر ارتوازية متدفقة لأن سطح الضغط فوق سطح الأرض. ويجب أن نذكر هنا أن مصطلح ارتوازي لا يستعمل فقط للآبار، وإنما يستعمل أيضاً للينابيع التي تنفج مياهها عبر التشققات الصخرية بدل ارتفاعها داخل البئر.



شكل ١٩-٤: يوضح شروط تشكل الآبار الارتوازية.

بئر (١) بئر ارتوازية غير متكفئة ويجب ضخ الماء.

بئر (٢) بئر ارتوازية متكفئة. بئر (٣) بئر غير ارتوازية ويجب ضخ الماء.

## النشاط الجيولوجي للمياه الجوفية

يشمل النشاط الجيولوجي للمياه الجوفية عمليات الانحلال والترسيب:

### ١- الانحلال Dissolution

تبدأ المياه المتغلغلة في باطن الأرض بالتفاعل مع فلزات الريفوليت وتجويتها كيميائياً، مما يؤدي إلى زوال بعض الفلزات أو الصخور بعملية الانحلال. وتنتقل المواد المنحلة بفعل المياه إلى مخزون الماء الجوفي، التي يمكن أن تنشق على السطح وتجري في الأودية النهرية، ومنها إلى البحار حيث تنضم فيها إلى المواد المنحلة الأخرى، وتساهم في بناء الرسوبات البحرية.

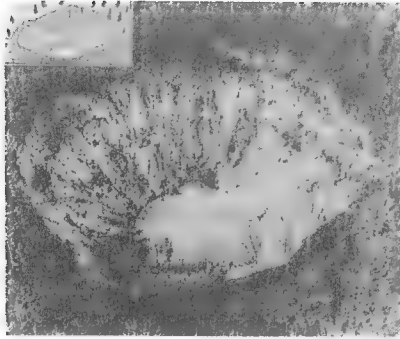
تكون الصخور الكربوناتية أكثر الصخور تجارياً مع الانحلال. ويمكن قياس معدلات انحلالها عن طريق تثبيت أقراص من الحجر الكلسي حدد وزنها بدقة، في أماكن محددة تتوزع في مناطق مختلفة خلال فترة زمنية معينة، ثم حساب معدل خسارتها الوزنية بالنسبة إلى الزمن. كما يمكن حساب هذا المعدل بقياس مقدار انخفاض سطح صخر معرض للتجوية خلال فترة زمنية معينة. فقد لوحظ أن هذا المعدل في المناطق غزيرة الأمطار، والتي يرتفع منسوب الماء الجوفي نحو سطح الأرض، ويكون الغطاء النباتي فيها كثيفاً، يصل إلى (١٠) ميليمترات كل ألف سنة. كما أجريت ملاحظات أخرى على شواهد القبور في إحدى الكنائس في إنكلترا، التي كانت من الحجر الكلسي الحاوي على مستحاثات زنابق البحر، تعتمد على حساب مقدار بروز هذه المستحاثات عن سطح الحجر الكلسي نتيجة الانحلال. ووجد أن معدل تآكل الحجر الكلسي بالانحلال كان (٢,٥) ميليمتراً بعد مضي (٥٠) سنة أي (٥٠) ميليمتراً في كل ألف سنة. وتستخدم في الوقت الحالي وسائل قياس أكثر دقة قد تصل إلى (٠,٠٠٥) من المليمتر من أجل تقدير معدلات انحلال الصخور الكربوناتية يؤخذ فيها في الحسبان الحث الميكانيكي لسطوح هذه الصخور.

المحتوى الكيميائي للمياه الجوفية: لقد وجد من خلال التحاليل التي أجريت على مياه الآبار والينابيع، أن المواد المنحلة الرئيسة الموجودة في المياه الجوفية هي: كلوريدات وسلفات وبيكربونات الكالسيوم والمغنيزيوم والبوتاسيوم والصوديوم والخلد. ومن تحديد أنواع هذه المواد المنحلة يمكن استنتاج أنواع الفلزات الرئيسة المكونة للصخور التي اشتقت منها هذه المواد، لذلك يمكن القول إن المحتوى الكيميائي للمياه الجوفية يكون حسب أنواع الصخور التي كانت على تماس معها. ويصبح الماء الجوفي ماءً عسراً *hard water* حين يرتفع محتواه بمركبات الكالسيوم والمغنيزيوم، ويعود ذلك إلى كون الصخور التي كانت على تماس معه كلسية دولوميتية. ويزداد تركيز السلفات والكلوريدات في المياه الجوفية التي توجد في مناطق جافة، حيث تكون عمليات التبخر شديدة، وتؤدي إلى ترسيب كميات كبيرة من كبريتات الكالسيوم وكربونات الكالسيوم، وأيضاً كلور الصوديوم في النطاق غير المشبع. وتكون الرب فيها قلوية *alkali soils* غير صالحة للزراعة، وبالتالي تكون مياهها الجوفية عسرة غير صالحة للشرب أو الاستهلاك البشري.

وقد تتحول المياه الجوفية العذبة في المناطق الشاطئية إلى مياه مالحة، نتيجة زيادة ضخها واستهلاكها، وتحرك المياه البحرية المالحة نحو اليابسة (شكل ٤-٢٧).

### الأشكال الناجمة من عمليات الإنحلال

أ- البالوعات أو الحفر الغائرة *sinkholes*: وهي تجاويف انحلال في الصخور الكربوناتها مفتوحة على سطح الأرض، ويطلق عليها اسم الدولينات *Dolines*. وهي من أكثر الظواهر الجيومورفولوجية شيوعاً وانتشاراً، وتوجد بأعداد كبيرة في الأراضي الكلسية. وتأخذ معظمها شكل القمع، بحيث تصل إلى أقصى اتساع لها عند سطح الأرض، وتزداد ضيقاً كلما غارت وتعمقت فيها. وقد يظهر منسوب الماء الجوفي في أعماق بعض البالوعات (شكل ٤-٢٠).



شكل ٢٠٠٤: بالوعة قطرها ١٣٠ متراً وعمقها ٤٥ متراً، تشكلت من انهيار سقف مغارة كلسية. وإن أنقاض للسقف المنهار شكلت تلوساً أخفى تكشف الصخر الأم، ويظهر منسوب الماء الجوفي في قاعها.

تتكون البالوعات عادة بإحدى طريقتين: فبعضها يتطور تدريجياً مع مرور الزمن دون تأثير في وضع الصخور، ففي هذه الحالة تنحل الصخور الكلسية الواقعة مباشرة تحت التربة بتغلغل المياه المشبعة بغاز ( $CO_2$ ) عبر الشقوق والفواصل الموجودة فيها، التي تؤدي إلى حل جدرانها الصخرية وتوسيعها تدريجياً، وتكون أماكن تقاطع الشقوق والفواصل مناسبة لتشكيل البالوعات، لأن حركة المياه السطحية المتغلغلة فيها تكون سهلة وسريعة. ويعرف هذا النوع بالبالوعات الانحلال solution sinkholes، حيث تتميز بضحالتها وقلة انحدار جوانبها. وبالمقابل يمكن

أن تتكون البالوعات فجأة نتيجة انهيار سقف التجاويف الكهفية وتعرف  
بالبوعات الانهيار collapse sinkholes، التي تتميز بأنها شديدة العمق وذات  
جوانب شديدة الانحدار كما هو واضح في الشكل (٤-٢٠). ويعتقد أن تشكل هذا  
النوع من البالوعات يعود إلى انخفاض منسوب الماء الجوفي في بعض المناطق، التي  
تنتشر فيها الصخور الكلسية الحاربة على كثير من التجاويف الكهفية، وزوال  
دعمها لها مما يؤدي إلى انهيار سقفها، وتشكل الكثير من البالوعات الانهيارية.

يتميز أحياناً عدد من البالوعات المتجاورة بنتيجة توسعها، ويتشكل منها  
منخفض كبير يعرف البالوعة المركبة compound sinkhole. وتتميز المناطق التي  
تنتشر فيها البالوعات بغياب نظام صرف مائي على السطح. وذلك لأن البحاري  
المائية تشق لنفسها مجاري جوفية ذات سقف، عن طريق جريان مياهها عبر هذه  
البالوعات. وقد تنهار أحياناً بعض أجزاء سقف هذه البحاري وتشكل ما يسمى  
نوافذ الكارست Karst windows، وتعرف الفتحات الكبيرة منها بالأوفالا  
Uvala<sup>(١)</sup>.

ويوجد أيضاً نوع من البالوعات يعرف بالبوليه Polye<sup>(٢)</sup>. وهي أحواض  
طولانية تتميز بأن أرضها مسطحة، وتحيط بها حواض مرتفعة من كل جهاتها،  
وتتكون في المناطق التي تعرضت للهبوط، سواء بحركات من الالتواء أو الإنكسار  
وكثيراً ما تصل مساحة بعض أحواض البوليه إلى بضع عشرات من الكيلومترات  
المربعة.

ب - كهوف الانحلال: تتألف الصخور الكلسية والدولوميتية من فلزين رئيسين  
هما الكالسيت والدولوميت. وهي تغطي ملايين الكيلومترات المربعة من سطح  
الباية. ومع أن هذين الفلزين غير قابلين للانحلال في الماء النقي إلا أنهما ينحلان  
بسهولة في الماء الحامل لثنائي أكسيد الكربون. وحين يتغلغل الماء السطحي داخل  
الأرض ينضم إلى المياه الجوفية، ويتفاعل مع الصخور الكربوناته وغيرها من

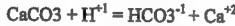
(١) الدولين والأوفالا والبوليه تسميات يوغسلافية.

الصخور ويصبح مشحوناً بأيونات الكالسيوم وغيرها من القلويات، وبأيونات البيكربونات حسب التفاعل التالي:



حمض الكربون                      أيون بيكربونات

ويهاجم أيون الهيدروجين فلز الكالسيوم، ويتيح من ذلك أيون البيكربونات وأيون الكالسيوم:



إن هذا الانحلال مثال على فعل التحوية الكيميائية، مثل فعلها في تفكك فلزات الصخور السيليكاتية. وفي كلتا الحالتين يهاجم حمض الكربون هذه الصخور على امتداد تماسه مع سطوحه في الفواصل والشقوق، وغيرها من الفتحات الصخرية. فالغرائث مثلاً تزول منه العناصر القلوية ليبقى منه مواد غضارية، بالإضافة إلى الفلزات المقاومة للفعل الكيميائي، مثل الكوارتز وغيره. أما الصخور الكربوناتية فتزول مادتها بشكل تدريجي، مما يؤدي إلى توسع الشقوق والفواصل وتشكل تجاويف يزداد حجمها تدريجياً، وعندما يصل التحريف إلى حجم يستطيع الإنسان الدخول فيه فإنه يسمى الكهف Cave، ويطلق اسم المغارة Cavern على الكهف الكبير جداً، أو على مجموعة من الكهوف المتصل بعضها ببعض. ومع أن معظم الكهوف المتشكلة في الصخور الكربوناتية صغيرة الحجم، إلا أن بعضاً منها يأخذ حجوماً كبيرة. وعلى سبيل المثال نذكر مغارة كارلسباد Carlsbad Cavern في الجنوب الشرقي من ولاية نيومكسيكو، التي تشمل حجرة كبيرة يبلغ طولها (١٢٢٠) متراً وعرضها (١٩٠) متراً وارتفاع سقفها (١٠٠) متراً.

### طبوغرافيا الكارست Karst topography

أنت كلمة كارست من إقليم كارست بيوغوسلافيا. إذ يتميز هذا الإقليم بمجموعة من الظواهر الجيومورفولوجية، التي ترتبط كلها بما ينجم من عمليات الانحلال بفعل المياه الجوفية. وتتمثل طبوغرافية الكارست بأشكال سطحية ناجمة



من تكشف وانهمار التعاويف الكهفية المترافقة مع تشكل البالوعات، وتتميز بوجود الكثير من الأحواض الصغيرة المغلقة. وتكون شبكة التصريف في هذا النوع من الأراضي غير نظامية، تختفي فيها المجاري المائية والأنهار بشكل فجائي وسريع، بسبب حدوث تصريف سريع لياهما في باطن الأرض.

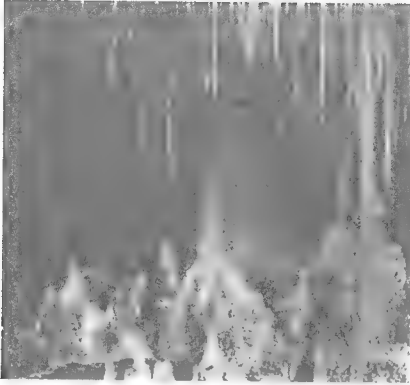
تساهم في تشكل الطبوغرافيا الكارستية عدة عوامل أهمها: توافر أمطار ومياه جارية غزيرة على سطح الأرض، وتوافر تربة فوق الصخور الكلسية، التي تساعد على توليد المزيد من ثنائي أكسيد الكربون، وقد لوحظ تأثيرها بالمقارنة مع صخور كلسية معرأة، حيث كان التطور الكارستي فيها أبطأ. ويضاف إلى ذلك بنية الصخور الكلسية، التي تتحكم في شدة التعرية والأشكال التضاريسية الناتجة.

أما ملاحظة التطور الكارستي وتحديد معدلات حدوثه، فهما من الأمور التي يصعب إجراؤها على المدى الطويل، وبخاصة في المناطق التي تأثرت عدة مرات بنشاط الجليديات، ولم تكن فيها الشروط البيئية ثابتة لفترات طويلة، وكذلك في المناطق المدارية التي تحوي أراضيها الكلسية أفضل الأمثلة النموذجية عن الطبوغرافيا الكارستية، يصعب أيضاً تقويم معدلات التطور الكارستي الذي شهد تغيرات كثيرة. وفي جميع الدراسات التي تهدف إلى تحديد معدلات الانحلال أو تشكل الطبوغرافيا الكارستية، يجب أن نأخذ جانب الحذر في إسقاط معدلات انحلال الكربونات في الوقت الحاضر على ما حصل في الماضي الجيولوجي.

### رسوبات كهوف الانحلال

تمثل بعض الكهوف جزئياً برسوبات سلتية وغضارية، وهي تمثل مواد كانت موجودة أصلاً في الصخور الكربوناتيّة المنحلة. وتحتوي كهوف أخرى رسوبات كلسية صلبة كيميائية المنشأ، تشكلت من قطرات الماء الراشحة من سقف الكهف وتدعى صخور القطرات dripstones، كما يقابلها في أرض الكهف رسوبات مماثلة، تشكلت من قطرات الماء المتساقطة على أرض الكهف. وتأخذ هذه الرسوبات أشكالاً متنوعة، وتعد من أجمل مظاهر الكهوف والمغارات التي تحتذب الزوار. وأكثر أشكالها انتشاراً النوازل stalactites وتكون على شكل قناديل

تندلي من السقف. والصواعد stalagmites وهي بروزات متطاولة من أرض  
المغارة، وتتحه نحو النوازل، ويمكن أن تتصل الصواعد بالنوازل وتشكل أعمدة  
columns (شكل ٤-٢١).

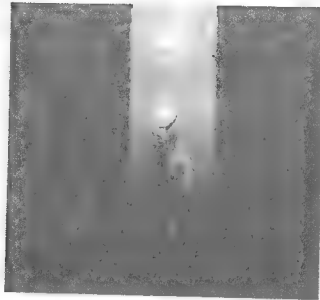


شكل ٢١-٤: الصواعد والنوازل في الحجرة الكبيرة Big Chamber لمغارة كارلسباد.

عندما تدخل المياه المشبعة بالمواد الكلسية إلى سقف المغارة، تبقى قطرات الماء  
معلقة، وتفقد جزءاً مما تحتويه من غاز ثنائي أوكسيد الكربون لنقصان كميته في  
الجو المحيط، وترسب كل قطرة حبيبة بلورية دقيقة من كربونات الكلسيوم في

سقف المغارة حول قناة مركزية، وباستمرار هذه العملية تتشكل النوازل (شكل ٢٢-٤). وعندما تسقط القطرة على الأرض، وتستقر قليلاً تفقد جزءاً آخر من غاز ( $CO_2$ )، ويترسب منها حبيبة دقيقة من كربونات الكالسيوم، وبهذا تتراكم رسوبات الصواعد.

تختلف النوازل عن الصواعد في البنية، فالبلورات في النوازل تكون مرتبة بشكل شعاعي حول قناة مركزية، بينما تكون في الصواعد مرتبة في شكل طبقات فوق بعضها بعضاً.



شكل ٢٢-٤: قطرة من الماء في نهاية النوازل. ويظهر فيها تشكل بلورات الكالسيت.

كذلك يمكن أن يؤدي ترسب كربونات الكالسيوم إلى تشكيل عروق من الكالسيت، أو قشرة كلسية تغطي الجدر الصخرية. وتعد أيضاً المياه الجوفية من أهم

العوامل التي تحول الرسوبات المفككة إلى صخور صلبة متماسكة. إذ تتوضع المواد المنحلة منها كالكربونات والسيليكات وأكاسيد الحديد في الفراغات بين حبات الرمل أو السلت أو الغضار وتؤدي إلى تلاحمها.

إن هذا الترسيب الكيميائي لا يحدث في المغاور والكهوف، إلا إذا كانت مملوءة بالماء، مع العلم أن معظم التجاويف الكهفية تتشكل تحت منسوب الماء الجوفي. إلا أن منسوب الماء الجوفي يمكن أن يهبط، ويفسح المجال لهذه التجاويف أن تتعرض للهواء وعندها يبدأ الترسيب الكيميائي. ويعود هبوط منسوب الماء الجوفي إلى نهوض اليابسة التي يرافقها تعميق الأنهار الجارية فيها لأوديتها (شكل ٤-٢٣). أو بسبب تغير الشروط المناخية من الرطوبة إلى الجفاف، مما يؤدي إلى انتقال الكهف أو المغارة تدريجياً من نطاق التشبع إلى نطاق التهوية، وبالتالي تغير الشروط من الانحلال إلى الترسيب.

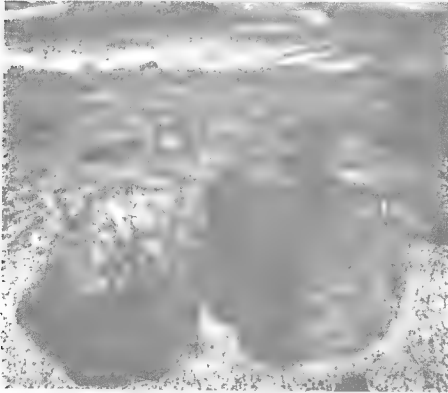


شكل ٢٣-٤: أدى نهوض اليابسة إلى تصيق للهر لوانديه وهبوط في منسوب الماء الجوفي، ووقوع المغاور في نطاق التهوية.

ويمكن أن توضع المياه الجوفية المتدفقة إلى سطح الأرض، رسوبات كلسية أو سيليسية على شكل صخور الطف والترافرتان travertine. وتوضع مياه الينابيع

احرارة. بالإضافة إلى ذلك مواد معدنية أخرى، كالكبريت والحديد وكبريت الزرنيخ وفلور الكلسيوم

تقوم المياه الجوفية أحياناً بالاببدال replacement، وهي عملية دياجينيزية تتضمن التحلل بعض الفلزات المكونة للصخور، وبالوقت نفسه ترسب مواد أخرى تأخذ شكلها وحجمها، مع حفظ الشكل النسيجي للمادة المزاحة، وتعرف عملية الابدال هذه بالاستعاضة metasomatism، وإن أفضل الأمثلة النموذجية للاستعاضة هو الخشب المتحجر. حيث تحل السيليكا محل المادة النباتية في جذوع الأشجار وجذورها (شكل ٢٤-٤). ولا بد من القول أن عملية الاستعاضة لا تقتصر على إبدال مادة عضوية مادة فخرية، إنما تشمل أيضاً إبدال مواد فخرية جديدة مواد فخرية أخرى، مثل إحلال فلز البيريت محل فلز الكالسيت المؤلف للمستحاثات، وهي ظاهرة المستحاثات البيريتية.



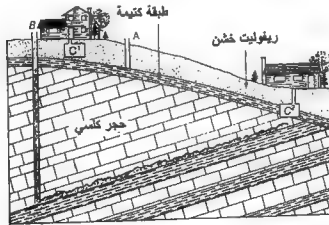
شكل ٢٤-٤: جذوع أشجار متحجرة تحررت بالتجوية من طبقات غضارية. وقد استبدلت بموادها العضوية السيليكا.

## بعض مشكلات المياه الجوفية التي يسببها الاستعمال البشري

يعد الماء من أهم الموارد الطبيعية التي يمتلكها الإنسان. فبالرغم من سهولة الحصول عليه، إلا أن التزايد السكاني المستمر يواجه نقصاً متزايداً في المخزون المائي في كثير من بقاع العالم، لذلك فإن الحصول على الماء الجوفي من الأمور التي تتطلب دراسة دقيقة جداً في تحديد مواقع جديدة لاستثمار المياه، وتأمين التوازن ما بين الاستهلاك والامداد المائي. وإن الحفاظ على نوعية الماء ذو أهمية كبيرة في المناطق التي تعاني من مشكلة النمو السكاني.

١- نوعية الماء **water quality**: يقصد بنوعية الماء الجوفي درجة حرارته وكمية المواد المعلقة والمواد المنحلة فيه ونوعيتها، والمادة العضوية الموجودة فيه (بصورة رئيسة الباكترينات) وعلاقتها بالاستعمال المطلوب.

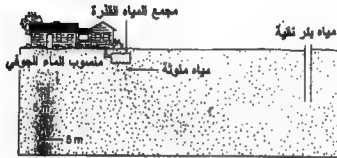
إن المصدر الشائع لتلوث الماء الجوفي في الآبار والينابيع هو الصرف الصحي. فالتسرب من مجمعات المياه المستعملة في النظافة، ومن المجاري وغيرها من المياه القذرة، يؤدي إلى تلوث المياه الجوفية. وحين يحصل التلوث في مياه جوفية موجودة في صخور ذات فراغات مسامية كبيرة أو فتحات واسعة، مثل الرسوبات الحصوية الخشنة أو الحجر الكلسي الكارستي، فإن التلوث يحدث بسرعة ويمكن أن يمتد لمسافات بعيدة (شكل ٢٥-٤).



شكل ٢٥-٤: سرعة حركة المياه الجوفية خلال جيوب الصخور الكلسية لا يسمح بتقيئتها.

إلا أنه حين يحدث التلوث في مياه جوفية محمولة في صخور دقيقة المسام ونفوذتها مثل الحجر الرملي، فإن التلوث يزول بعد مسافة قصيرة لا تتجاوز (٣٠) متراً (شكلاً ٤-٢٦). ويعود هذا الاختلاف إلى المساحة السطحية الداخلية لمسام الصخور التي تتحرك فيها المياه الملوثة. ففوة الجذب الجزئي تمسك الماء وتزيد من نقاوته بالأسباب التالية:

- ١- تدمير الباكترينات بالأكسدة.
- ٢- ترشيح الباكترية خارج الماء المتسرب.
- ٣- تدمير الباكترينات بعضويات أخرى تعمل على استهلاكها.



شكل ٤-٢٦: تنقية المياه الجوفية للملوثة في الصخور الرملية.

تحدث تنقية الماء المتغلغل في الأرض داخل نطاق التهوية وأيضاً في نطاق التشبع، وبما أن حبيبات الغضار أصغر بكثير من حبيبات الرمل، فيجب التوقع أن الغضار ذا المساحة السطحية الداخلية الكبيرة جداً، هو أفضل الأوساط التي تعمل على تنقية الماء الجوفي. إلا أن الرسوبات الغضارية ليست نموذجية لحركة الماء الجوفي لأنها كثيفة.

وفي كثير من المناطق تُحوّل مياه المصانع والمخارير إلى الأنهار، ومع أن بعض التقية يمكن أن تجري خلال انتقالها بالنهر. إلا أن المسافة التي تنقل إليها لا تكون كافية لحصول التقية، وغالباً ترتفع نسبة التلوث فيها لدرجة تصبّح فيها العوامل الطبيعية غير فعالة.

**٢- تخزين النفايات الخطرة تحت الأرض:** إن أحد الاهتمامات البيئية الرئيسة في البلدان الصناعية، هو احتياجات الصناعة فيها للتخلص من نفايات خطرة، وبخاصة المواد العالية السمية أو المواد المشعة. وقد أثبتت الأيام أن إلقاء هذه النفايات على السطح يؤدي بسرعة إلى تلوث المياه السطحية والجوفية، وخلق مشكلات صحية خطيرة جداً، قد تؤدي إلى الوفاة.

ففي البلدان التي تمتلك الأسلحة أو المفاعلات النووية لديها مشكلة التخلص من النفايات المشعة. وقد انتهت الدراسات التي أجريت حول هذا الموضوع، إلى أن دفن النفايات تحت سطح الأرض في أماكن مناسبة هو أسلم طريقة، شريطة أن توضع ضمن حاويات لا تتأثر كيميائياً بالمياه الجوفية، ولا فيزيائياً بالتشوهات الصخرية الطبيعية أو بعمليات الحفر تحت الأرض من قبل الإنسان.

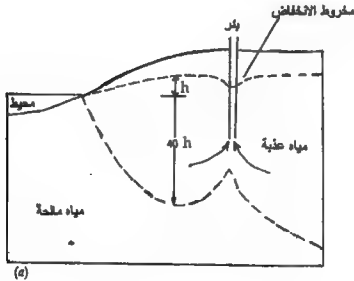
وإن وضع النفايات السامة تحت سطح الأرض، أو في أماكن عميقة جداً، يواجه الخوف من فعل المياه الجوفية. فالمياه الجوفية عامل حال بسبب طبيعتها الحمضية، وإن تماسها لأي مادة سامة بما فيها الحاويات التي تُعلب فيها النفايات، يجعلها تتآكل وتتحل وتنتشر بعيداً عنها بسرعة تعادل حركة المياه الجوفية البطيئة، وهذا يعني أنه على عشرات أو مئات أو ألوف السنين، يُمكن للمياه الجوفية أن تُحرك المواد الضارة المنحلة إلى مسافات كبيرة، وتدخلها في أنظمة هيدروجيولوجية سريعة الحركة.

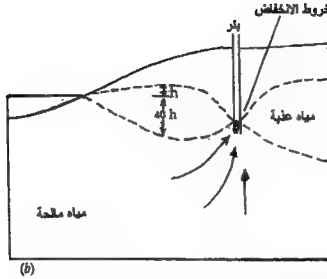
إن التخزين الآمن للنفايات السامة أو المشعة تحت سطح الأرض على مدى زمني طويل، يتطلب معرفة واسعة حول أنظمة المياه الجوفية المحلية والإقليمية. ويقتضي ذلك أيضاً التوصل إلى فهم احتمال تغيير هذه الأنظمة في المستقبل، بنتيجة تحركات القشرة الأرضية، وتغيرات المناخ محلياً وإقليمياً، وغيرها من العوامل



الطبيعية، التي يمكن أن تؤثر في مواقع تخزين النفايات.

٣- اجتياح المياه المالحة **Saltwater invasion**: يوجد نوع خاص من تلوث الجوفي هو اجتياح الماء المالح. ويحدث هذا في المناطق الشاطئية، وفي الجزر التي يوجد فيها مياه جوفية عذبة. ولا بد لنا لفهم هذه المشكلة من أن نعرف العلاقة بين المياه الجوفية العذبة والمالحة. إن الوزن النوعي للماء الجوفي العذب أقل من الوزن النوعي للماء المالح الطبيعي، ولهذا فإن الماء العذب يطفو فوق الماء المالح مكوناً ما يشبه شكل العدسة، ويمتد في بعض الأحيان إلى أعماق كبيرة. فإذا لم يكن هناك جريان سطحي فإن هذا سيؤدي إلى توازن، تطفو فيه كتلة الماء العذب فوق الماء المالح. وحتى يتحقق هذا التوازن، يجب أن يعلو منسوب الماء الجوفي العذب فوق مستوى سطح البحر، بمقدار  $(\frac{1}{40})$  من عمقه تحت هذا المستوى، وهذا يعني أنه إذا انخفض منسوب الماء الجوفي العذب، بمقدار متر واحد، فإن قاعدة الماء العذب سترتفع بمقدار أربعين متراً. ولهذا فإن الضغط الجائر للمياه الجوفية من الآبار القريبة من المناطق الشاطئية، يؤدي إلى تشكل مخروط انخفاض في أعلى عدسة المياه الجوفية وقاعدتها، وهذا سيرفع مستوى الماء المالح في البئر ملوثاً محتواها (شكل ٤-٢٧).





شكل ٢٧-٤: تلوّث مياه البئر بالمياه المالحة.

a - قبل ضخ المياه.

b - بعد ضخ المياه.

٤- **خُسْفُ الأراضي Land subsidence**: لقد أدى استنزاف المياه الجوفية في بعض الأماكن إلى هبوط الأراضي على مساحات واسعة. إن مثل هذه التأثيرات واضحة في الجنوب الغربي من الولايات المتحدة. حيث أدى ضخ المياه الجوفية للأغراض الزراعية إلى خُسْف سطح الأرض، وحدثت أضرار فادحة في الأبنية والطرق والجسور وعمديدات الأنابيب والمجارير تحت سطح الأرض، كما زاد في مساحة الأراضي المعرضة للفيضان.

ومما ينذر بالأخطار المحيطة هو الهبوط الذي يحدث في عدد من المدن الكبرى نتيجة استنزاف المياه الجوفية، وبخاصة تلك المدن التي تم إنشاؤها على أرض مؤلفة من رسوبات سميكة وغير متماسكة تحوي كميات كبيرة من الماء، مثل سهول الفيضان والدلتا والسهول الشاطئية، أو أماكن بحيرات أو مستنقعات جافة.

إن ضخ المياه الجوفية من الآبار القريبة بعضها من بعض في هذه المناطق، أدى إلى انخفاض منسوب الماء الجوي على نطاق واسع، وإزالة الماء من الرسوبات غير

التماسكة، وبالتالي روال الضغط الهيدروليكي، الذي كان يدعم تحمل هذه الأراضي للمنشآت التي تستند إليها. وبذلك تحول التحمل من مواد رسوبية مساماتها مملوءة بالماء إلى مواد حبيبية مساماتها فارغة، مما أدى إلى إعادة ارتصافها وترصيفها ونقصان حجمها، وهبوط الأراضي الواقعة فوقها.

## الفصل الخامس

### الجليديات والنشاط الجليدي

الجليدية glacier جسم طبيعي صلب، ذو أبعاد كبيرة جداً، مؤلفة من بلورات من الجليد، تشكلت على سطح الأرض نتيجة التراكم المستمر للثلوج وإعادة تبلورها، وتظهر عليها دلائل تشير إلى تحركها نحو الأسفل، فوق سطوح منحدرية بتأثير الثقالة الأرضية. وللجليديات علاقة وثيقة بدورة المياه في الطبيعة، إذ إن تشكلها يؤدي إلى انخفاض منسوب الماء في البحيرات والبحار والمحيطات، وتقهقرها يؤدي إلى ارتفاع منسوب الماء فيها. تغطي الجليديات مساحات تقرب من ١١٪ من السطح القاري، و٢,٧٪ من سطح الكرة الأرضية، وقد كانت خلال العمر الجليدي الرابعي Quaternary Ice Age تغطي ٣٥٪ من سطح القارات.

ولللجليديات فعل بناء وتخريب، وهذا يؤدي إلى نحت وتغيير طبوغرافية سطح الأرض، ونقل كميات كبيرة من المواد المفتتة، وتوضع رسوبات متنوعة.

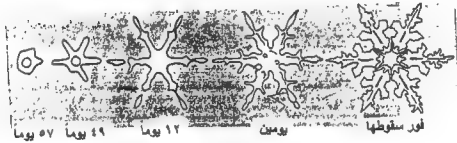
#### خط الثلج

يتساقط الثلج على سطح الأرض في نطاقات مناخية مختلفة، إذ يتشكل من تكاثف بخار الماء الموجود في الهواء عندما تنخفض درجة الحرارة إلى ما دون درجة التجمد،



تكون جزيئات الماء في الحالة السائلة قادرة على التحرك متقاربة من بعضها بعضاً بفعل التجاذب القوي بين الأطراف المتعاكسة الشحنة لجزيئات الماء، أما في الحالة الصلبة فإن روابط الهيدروجين تبعد الجزيئات عن بعضها، وتكون البلورة أكثر مسامية، مما يؤدي إلى أن تكون كثافة الثلج أقل من كثافة الماء.

عندما تصل بلورات الثلج إلى سطح الأرض، وتبدأ بالتراكم فوق بعضها بعضاً، تكون ذات مسامية عالية جداً تصل إلى نحو ٩٠٪. وبما أن الهواء يتخلخل في فراغاتها البلورية، فإن الأجزاء الدقيقة منها تزول بتحولها إلى بخار، لا يلبث أن يتكاثف في اتجاه مراكزها، فتصبح بلورات الثلج تدريجياً أصغر حجماً وذات سماكة أكبر، وتتحول إلى حبيبات مدورة، وهي حالة الثلج في نهاية الشتاء (شكل ٢-٥).



شكل ٢-٥: تحول بلورات الثلج إلى حبيبات مدورة بعد مضي (٥٧) يوماً على سقوطها.

عندما يغطي الثلج الجديد القديم ترتص الحبيبات بنتيجة الضغط المطبق عليها. وتحول البلورات إلى مرحلة أكثر كثافة تعرف بمرحلة الثلج الحبيبي névé. وتشير هذه المرحلة إلى الحد الأعلى من زيادة الكثافة بالرص الميكانيكي. وبعد هذه المرحلة تصبح التغيرات الفيزيائية ناتجة من عمليات إعادة التبلور recrystallization processes.

وهذا تجدر الإشارة إلى أن انقسام الأسطح من حقول الثلج يتأثر بالحرارة شمسية فينوب جزء بسيط منه ويتسرب إلى الأعماق. ثم لا تلبث المياه على السطح أن تتجمد ثانية لتشكل صفيحة رقيقة من الصقيع، وتعاد العملية نفسها في الأمام الدافئة، وقد يترسب فوق هذه الصفائح بعض الرواسب الرملية، مما يعطي الملوحة المترامية نوعاً من التطبيق، يستطيع بواسطته أن تعرف سماكة طبقة الثلج التي اضميقت كل عام، ونحسب عمر الجليد.

أما المياه المتسربة إلى الأعماق فتتبلور مولدة ضغطاً كبيراً على جميع أشكال وحجوم البلورات، مما يؤدي إلى ذوبان البلورات الصغيرة، ونمو البلورات الكبيرة على حسابها. وباستمرار عملية التبلور هذه من سنة لأخرى يتحول الثلج الجليبي إلى بلورات جليد حبيبية الشكل وجيدة النواص (شكل ٣-٥). وبالرغم من إعادة التبلور والتحول إلى جليد، يبقى بين الحبيبات البلورية، غشاوة مائية رقيقة تحوي أيونات لبعض الكلوريدات وبخاصة كلور الصوديوم، وإن وجود مثل هذه الأيونات يخفض درجة التجمد ويقي الغشاوة في الحالة السائلة. وتلعب هذه الغشاوة دوراً كبيراً في حركة الجليديات. يكون الجليد في البدء مسامياً أبيض اللون، ثم يصبح متراصاً أزرق اللون وعتيم المسامية.



بلورات الجليد



بلورات مترامية



جليد متراص

شكل ٣-٥: عمليات إعادة التبلور التي تؤدي إلى تشكل بلورات الجليد. يمكن أن يصل قطر البلورة إلى بضعة سنتيمترات. وفي كل مرحلة تزداد الكثافة.

يتصف الجليد ببعض الصفات المميزة للأحماط الصخرية الثلاثة. فهو يبدأ بالتبلور عند انخفاض درجة حرارة السائل ليشكل جسماً صلباً، وهي صفة مميزة للصخور النارية. كما أنه يتساقط على شكل حبيبات مفردة تترام على السطح مثل تراكم الرسوبات، ثم ترتص وتتطبق كالصخور الرسوبية. وتشير دلائل التلغق الداخلي وإعادة التبلور التي تلاحظ في الجليد إلى تأثير الضغط، وهما صفتان تميز الصخور الاستحالية. إلا أن الجليد يتميز عن أنواع الصخور بنقطة انصهاره المنخفضة، ووزنه النوعي المنخفض الذي يبلغ (٠,٩).

### توازن الكتل الجليدية

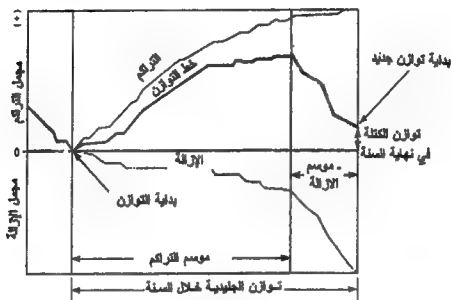
تتغير كتل الجليديات باستمرار من فصل لآخر حسب تغيرات الطقس، كما تتغير بمرور الزمن مع تغير الشروط المناخية المحلية، أو العالمية على سطح الأرض. فالتغيرات البيئية المستمرة تؤدي إلى تغيرات في معدل كمية الثلوج المتساقطة التي تضاف إلى الجليديات، وأيضاً في معدل الكمية التي تذوب منها بالانصهار، وهذا ما يحدد حالة توازن الكتل الجليدية. وعلى هذا يمكن أن يعرف توازن الكتل الجليدية: بأنه مقدار التغير الذي يحدث في الكتلة الإجمالية للجليدية خلال سنة واحدة. ويُستخدم في قياس هذا التغير مصطلحان هما التراكم accumulation، أو كمية الثلج المتساقطة، والإزالة ablation أو كمية الجليد المنصهر.

تشمل الإزالة في الجليديات القطبية وتحت القطبية، تبخر جزء من ماء انصهار الجليد السطحي، والتبخير المباشر من الثلج بالتصعد، إضافة إلى ما ينصهر من الجليد في الأجزاء القاعدية، وانفصال كتل الجبال الطافية من الرفوف الجليدية.

تنمو الجليديات عندما يتساقط على سطحها كميات من الثلوج تفوق الكميات التي تذوب منها، فهي بتعبير آخر بحالة توازن إيجابي (شكل ٥-٤). وبالمقابل حين تزيد الكميات التي تذوب منها على ما يضاف إليها من ثلوج، تكون في حالة توازن سلبي، وهذا ما يؤدي إلى تقدم الجليديات أو تراجعها. ويفصل خط



التوازن ما بين منطقة التراكم ومنطقة الإزالة، وهو يحدد السوية التي يتعادل فيها التراكم مع الإزالة، وهو يتطابق مع الحد السفلي للتلج الجديد في نهاية الصيف في جليديات المناطق المعتدلة (خط التلج). وعادة يتغير ارتفاع خط التوازن من سنة إلى أخرى، حيث يرتفع في السنوات الجافة، ويهبط في السنوات الرطبة. وقد كان خلال العصر الجليدي أخفض بمئات الأمتار مما هو عليه الآن.



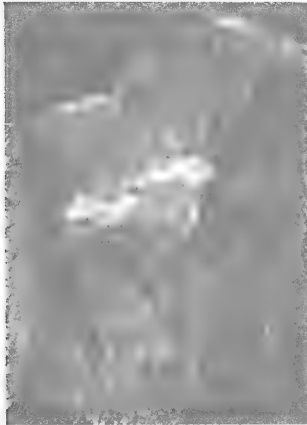
شكل ٤.٥: رسم بياني يبين كيف يتحدد توازن الجليدية بالزيادة والتراكم خلال دورة سنوية كاملة.

## أشكال الجليديات

يمكن تصنيف الجليديات اعتماداً على أشكالها وامتدادها واتجاه تحركها إلى:

- ١- جليديات الحلبات
- ٢- جليديات الوادي
- ٣- جليديات السفوح
- ٤- القبعات الجليدية

١- جليديات الحلبات **Cirques glaciers**: وهي جليديات صغيرة، تتخذ أشكالها واتجاه حركتها بالتضاريس الخيضة بها، فهي تشغل في معظم الأحوال منخفضاً محمياً من الرياح وأشعة الشمس، وتكون جدرانها شديدة الانحدار. ويأخذ قاعه شكلاً مقعراً (شكل ٥-٥).

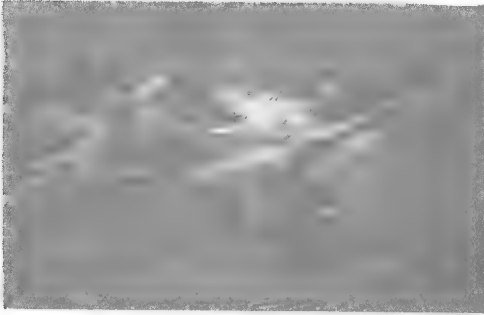


شكل ٥-٥: جليدية الحلبات.

٢- جليديات الوادي **Valley glaciers**: وهي السنة جليدية تنتشر على جوانب ومنحدرات المرتفعات الجبلية، من أحواض تجمع الجليد التي تعلو خط الثلج. وهي تتقدم ببطء وبحركة خطية على طول أودية نهريّة قديمة، ويتحدد

شكلها بالبنية الصخرية والشكل الحثي لهذه الوديان (شكل ٦-٥).

وهنا نلاحظ وجود علاقة وثيقة بين أحواض تجمع الجليد وتغذيتها من جهة، ومساحة اللسان الجليدي من جهة ثانية. فإذا كانت نسبة الثلج المتساقط كبيرة، تقدم اللسان الجليدي بنسبة كبيرة باتجاه أسفل المنحدرات الجبلية. وإذا ما ارتفعت درجة الحرارة أو قلت كمية الثلج المتساقط، تقهقر اللسان الجليدي. وتعرف هذه الألسنة الجليدية بالأنهار الجليدية لأنها تشق طريقها في وديان واضحة الجوانب، وملؤها الجليد بدلاً من الماء.

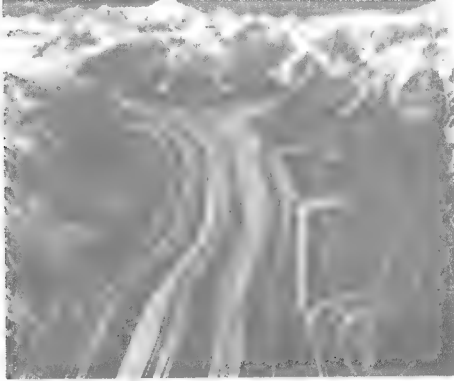


شكل ٦-٥: جليديات الوادي

يمكن تقسيم جليديات الوادي اعتماداً على مظاهرها البنيوية إلى جليديات بسيطة، وجليديات مركبة، فالأولى جليديات منفصلة دون روافد مغذية، بينما تكون الثانية مؤلفة من عدة جليديات مندمجة، يمكن تمثيلها بنهر ذي عدة روافد، مثل جليدية بارنارد في الآسكا (شكل ٧-٥).

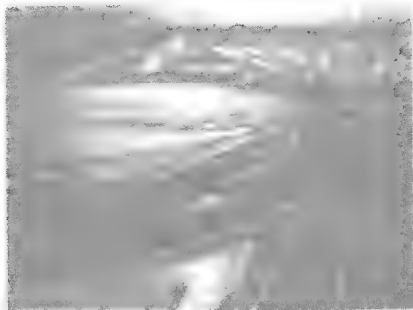
وتتميز الجليديات الرافدة بأنها تحتفظ بهويتها داخل التدفق الجليدي الرئيس،

بعكس مياه روافد الأنهار، التي تختلط مياهها مباشرة مع مياه النهر الرئيس.



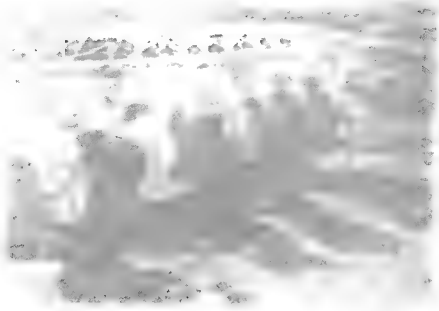
شكل ٧.٥: جليدية بارنارد Barnard وروافدها تشكل نهر المملوت الجليدي في الأسكا.

٣- جليديات السفوح Piedmont glaciers: تتشكل عندما تنتهي جليدية الوادي البسيطة أو المركبة إلى السفوح الجبلية (شكل ٨.٥).



شكل ٨.٥: جليديات السفوح ومورينتها.

٤- **القبعات الجليدية Ice caps**: فهي تغطي الأراضي المرتفعة من السلاسل الجبلية في المناطق المعتدلة والمدارية، كما تغطي جزءاً كبيراً من مختلف الأراضي الجبلية في المناطق الباردة. وجميعها تظهر عليها آثار التدفق باتجاه الأسفل وباتجاه شعاعي. وأفضل الأمثلة عنها القبة الجليدية في جبال الأنديز في البيرو. وهي قبة جليدية مدارية تغطي مساحة تقرب من (٧٠) كيلو متراً مربعاً، وتقع حدودها السفلية على ارتفاعات تقرب من (٤٩٥٠) متراً، وإن أضخم قبة جليدية في العالم، تقع في أيسلندا حيث تبلغ أبعادها (١٤٠×١٠٠) كم، وتصل امتداداتها إلى محاذاة الشواطئ الجنوبية الشرقية (شكل ٩.٥).



شكل ٩-٥: اللبنة الجليدية.

**٥- الغطاءات الجليدية Ice sheets:** وتعرف أيضا بالجليديات القارية continental glaciers وهي أضخم ما عرف من جليديات العالم، وتغطي معظم سطح اليابسة التي تقع تحتها. ويقتصر وجود الغطاءات الجليدية في وقتنا الحالي على جزيرة غرينلاند Greenland وقارة القطب الجنوبي Antarctica، حيث يتجمع فيها ما يقرب من ٩٥% من جليد العالم، وتبلغ مساحتها حوالي ١٠% من سطح اليابسة. وتتميز هذه الجليديات بسماكتها الكبيرة وبحركتها الواسعة باتجاه الأطراف. ويعتقد أنها تمثل البقية الباقية من الغطاءات الجليدية والجليديات الضخمة التي غطت مساحات واسعة خلال العصر الجليدي البليستوسيني من أمريكا الشمالية وأوروبا وآسيا وقارة القطب الجنوبي.

**أ - الغطاء الجليدي في جزيرة غرينلاند:** يغطي هذا الغطاء ثلاثة أرباع مساحة الجزيرة، وتبلغ السماكة القصوى في الأجزاء المركزية لهذا الغطاء نحو (٣٤٠٠ م) متراً. ونقل باندا، المعروف (شكل ٩-٥). وقد أدى وزنها الهائل إلى هبوط أجزاء من قشرة الأرض الواقعة تحتها إلى ما دون مستوى سطح البحر. يعد هذا

من الغرب حراً جزر جيلبي، حيث يتجهز الساحل الغربي بكثرة  
 من مياه البحر حول الساحل الشمالي، فركيزاً ما يمتد الغطاء الجليدي على  
 المياه، حيث تبرز على سطح اليابسة، وتصل إلى البحر، حيث تشكل جبالاً  
 جليدية ضخمة، قد يصل طول بعضها إلى نحو (٤٠) كيلو متراً وترتفع إلى نحو  
 ٨٠-٩٠ متراً فوق سطح الماء. وبرز فوق الغطاء الجليدي قسم جليدية ناتئة  
 تسمى بالنواتي minataks (شكل ١١٥).



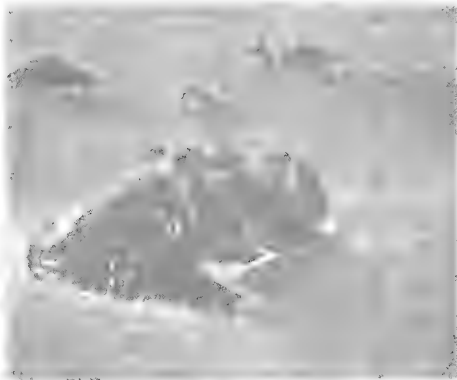
تتمثل ١٠٥: برافيل عبر وسط جزيرة غرينلاند من خليج نيسكو Disco في الغرب إلى فرانز جوزيف  
 Franz Josef Land في الشرق.

وقد أجريت في السنوات الأخيرة حسابات تقريبية على معدل الضياع السنوي  
 لهذا الغطاء الجليدي فكانت كالتالي:

معدل الإزالة السنوي بالذوبان والتصدع نحو	٣١٥ كم <sup>٣</sup> من الماء
معدل الإزالة السنوي بانفصال الجبال الطافية نحو	٢١٥ كم <sup>٣</sup>
إذن معدل الإزالة الإجمالي يكون	٥٣٠ كم <sup>٣</sup>
أما التراكم السنوي من الثلوج	٤٤٦ كم <sup>٣</sup>

وهكذا فإن كمية الإزالة تفوق كمية التراكم السنوي، وهذا يعني أن الغطاء

الجليدي يفقد من كتلته ما يعادل (٨٤) كم<sup>٣</sup> من الماء سنوياً. فإذا عرفنا أن الحجم الكلي للجليدية هو (١٠×٣,٧) كم<sup>٣</sup> أي ما يعادل (١٠×٣,٤) كم<sup>٣</sup> من الماء، فإنها ستحتاج إلى مدة تقرب من (٤٠,٠٠٠) سنة حتى تزول الجليدية نهائياً، إذا استمرت الشروط المناخية كما هي عليه الآن.

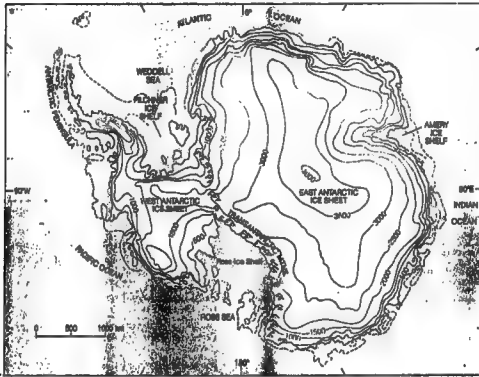


شكل ١١.٥: للتواتر في شرقي جزيرة غرينلاند، تصل إلى ارتفاع حوالي ٣٠٠ متراً فوق سطح الغطاء الجليدي.

ب - الغطاء الجليدي في قارة القطب الجنوبي: تمثل عادة قارة القطب الجنوبي على الخرائط بأنها تقع بكاملها تحت غطاء جليدي واحد. وفي الواقع تقع هذه القارة



تحت غطاءين جليديين يلتقيان على امتداد سلاسل جبلية، تتجه من الشمال إلى الجنوب، وتقع في النصف الغربي لهذه القارة (شكل ١٢-٥). والغطاء الجليدي الشرقي أكبر بكثير من الغطاء الجليدي الغربي، ويغطي قارة القطب الجنوبي وهو الغطاء القطبي الوحيد في العالم بالمقارنة مع القطب الشمالي الذي يقع في مركز المحيط المتجمد الشمالي وتغطيه طبقة رقيقة من الجليد.



شكل ١٢-٥ يوضح الغطاء الجليدي للشرقي والغطاء الجنوبي الغربي يصلهما سلاسل جبلية تمتد من الشمال إلى الجنوب في قارة القطب الجنوبي.

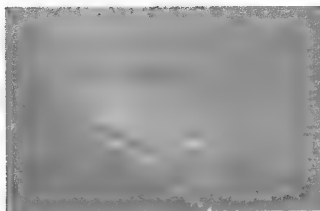
وتتميز قارة القطب الجنوبي بإحتوائها على أعلى معدل للمرتفعات الجبلية، وأدنى معدل لدرجات الحرارة بالنسبة لمختلف القارات. أما غطاؤها الجليدي الغربي فيغطي

## مجموعة من جزر أرخبيل القطب الجنوبي Antarctica archipelago

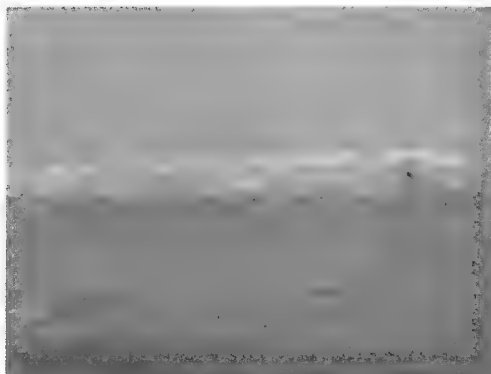
وقد دلت القياسات التي أجريت على سماكات جليد قارة القطب الجنوبي على أنها تصل إلى (٣٦٠٠) متر أو أكثر. ويقدر الحجم الكلي للغطائين الجليديين في هذه القارة بـ (١٠ × ٢٤) كم<sup>٣</sup>. وإذا ما ذابت هذه الكمية فإنها سترفع مستوى مياه البحار في العالم إلى ما يقرب من (٦٥) متراً على منسوبها الحالي.

أما القيعات الجليدية فلها هندسة بسيطة، إذا ما قورنت بالغطاءات الجليدية، فهي عادة قبة مفردة وعريضة، بينما يكون للغطاءات الجليدية تعقيد هندسي أكبر، بافتراض أنها مولفة من عدد كبير من القيعات، التي تشكل تراكمات سرجية يتحرك فيها الجليد باتجاه الأطراف، ليتلاقى بعضها مع بعض في المنخفضات، ويدل على ذلك آثار التحرك داخل الغطاء الجليدي. ولا تبقى هذه الهياكل ثابتة، فقد تغير مواقعها مع مرور الزمن، وغو الغطاء الجليدي أو تقلصه.

تشكل في الهوامش البحرية للغطاءات الجليدية امتدادات بحرية تدعى رفوف الجليد Ice shelves، التي تتطور بشكل جيد في الخلجان الشاطئية الكبيرة (شكل ١٣-٥). فهي متصلة بجليد اليابسة، وتمتد إلى داخل البحر لتنتهي بمحرف جليدية شديدة الانحدار، يصل ارتفاعها عن سطح البحر إلى نحو (٥٠) متراً، كما يمكن أن يصل امتدادها داخل البحر إلى مئات الكيلومترات، وهي تتغذى باستمرار من تدفق الجليد من اليابسة ومن تساقط الثلوج على سطحها. وتنفصل عن أطراف هذه الرفوف الجليدية كتل جليدية هائلة الحجم تطفو في البحر، ويمكن أن تأخذ أشكال جبال أو جزر عائمة Ice bergs (شكل ١٤-٥). وقد استخدم بعض هذه الجزر العائمة لإقامة محطات علمية معزولة.



شكل ١٣.٥: الرف الجليدي في قارة القطب الجنوبي.



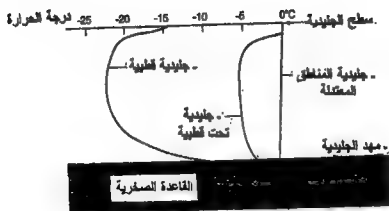
شكل ١٤.٥: كتلة جليدية عالمة في بحر روس Ross، وقد انفصلت عن الرف الجليدي روس في قارة القطب الجنوبي.

وقد أحرث مؤخراً دراسات حول الجدوى الاقتصادية، التي يمكن الحصول عليها إذا أمكن نقل بعض الجبال الجليدية العائمة، من قارة القطب الجنوبي، إلى بعض أقطار المناطق الجافة في الشرق الأوسط، حيث يمكن الحصول من انصهارها على كميات كبيرة من المياه العذبة لري الأراضي الزراعية، على الرغم من فقدان جزء كبير منها أثناء رحلتها الطويلة. وقد نجد في يوم ما من المستقبل حقولاً زراعية واسعة في مناطق صحراوية تسقى من مياه الجبال الجليدية، التي تشكلت من الثلوج التي تساقطت في أواسط قارة القطب الجنوبي منذ عشرات ألوف السنين.

### حرارة داخل الجليديات

باستثناء الطبقة السطحية من الجليديات التي تتجمد في الشتاء، فإن الجليد في داخل معظم الجليديات يكون عند نقطة الانصهار بالضغط *pressure melting point*، وهي درجة حرارة انصهار الجليد تحت ضغط معين (شكل ١٥٥). وتحت مثل هذه الشروط يمكن أن يوجد الماء والجليد مع بعضهما بعضاً بحالة توازن. فجليديات المناطق النائية يكون معظم جليدها عند نقطة الانصهار بالضغط. أما في جليديات المناطق الباردة حيث يكون معدل حرارة الجو السنوية دون درجة التجمد، وتكون حرارة جليدها أدنى من نقطة الانصهار بالضغط ولا يحصل فيها انصهار، أو قد يحصل ولكن على نطاق ضيق، ويسمى هذا النوع من الجليديات، الجليديات القطبية *polar glaciers*. أما الجليديات تحت القطبية *subpolar glaciers* فهي بمثابة نموذج وسطي يمكن أن يكون جليدها السطحي عند نقطة الانصهار بالضغط في فصل الصيف، أو أن جليدها تحت السطح عمر أو مخرن يكون بحرارة أدنى من درجة التجمد.

أما الجليديات الضخمة الواقعة في أعالي السلاسل الجبلية، فيمكن أن تحوي جليداً قطبياً أو تحت قطبي في أجزائها العلوية، وجليداً معتدلاً في أجزائها السفلية. أما الجليد في الأجزاء القاعدية من الغطاءات الجليدية فيمكن أن يكون في نقطة الانصهار تحت الضغط، بسبب خضوعه إلى ضغوط عالية ناجمة عن السماكة الكبيرة لهذه الغطاءات.



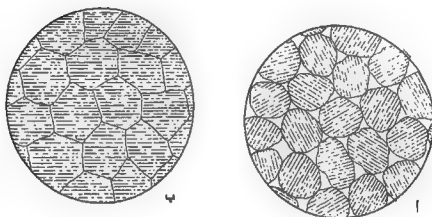
شكل ١٥م: رسم بياني يوضح تباين درجات الحرارة ما بين الجليديات القطبية وتحت القطبية وفي المناطق المعتدلة.

إن حرارة الجليد عامل مهم في تحركه. ويلعب ماء الانصهار في قاعدة الجليديات دور الزيت المخفف للاحتكاك، ويسهل تحرك الجليدية وانزلاقها. أما الجليديات القطبية فتكون باردة جداً لدرجة تجعلها متجمدة بكاملها فوق القاعدة الصخرية التي تستند إليها، ولا تشمل ظواهر الحركة فيها عمليات انزلاق قاعدي، ويكون معدل تدفقها بطيئاً للغاية.

## حركة الجليديات

تدعى حركة الجليديات بالتدفق flow. وقد يبدو أن هذا التعبير غير متطابق مع طبيعة الجليد الصلب. إلا أن الجليد بطبيعته قابل للتدفق. أما طريقة التدفق فهي مجموعة من عمليات معقدة يمكن أن نجعلها في نمطين رئيسين: الأول التدفق اللدن plastic flow، ويشمل الحركة داخل الجليد. إذ إن الجليد يتصرف عادة تصرف الأجسام الصلبة الكسورة brittle solid، إلى أن يصل الضغط الواقع فوقه إلى ما

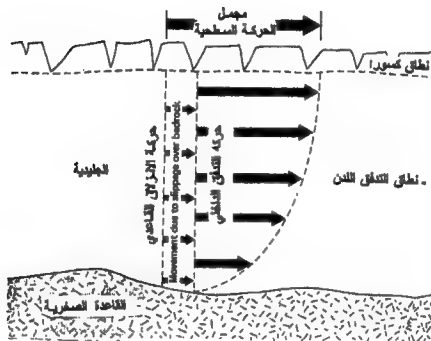
يعادل وزن سماكة (٥٠) متراً من الجليد، وحينئذ يسلك سلوك المادة اللدنة، ويبدأ بالتدفق على سطح منحدر. وهذا يعود إلى البنية الجزيئية للجليد. إذ يتألف من طبقات من الجزيئات المتراسة بعضها فوق بعض. وإن الروابط *bonds* بين الطبقات المتتالية أضعف من تلك الموجودة بين الجزيئات في الطبقة الواحدة. وحين يتجاوز الجهد قوة الروابط بين الطبقات فإنها تنزلق فوق بعضها بعضاً. وقد دلت دراسات النسيج الجليدي بالجهر الكتروني: أن كل بلورة قد غيرت من شكلها ووضعيتها تحت تأثير اختلاف الجهد، وأصبحت البلورات جميعها موجهة حسب اتجاه الحركة (شكل ١٦-٥). ويعتقد إن الغشاوة الكلوريدية الموجودة بين البلورات قد ساهمت في هذه العملية.



شكل ٥- ١٦: يوضح البلورات في الثلج الحبيبي (أ)، والبلورات في الجليد (ب). تشير الخطوط في البلورة إلى التوجيه.

أما النمط الثاني فهو انزلاق كتلة كاملة من الجليد على القاعدة الصخرية ويعرف بالانزلاق القاعدي *basal slip*، حيث تقوم المياه الموجودة في أعماق الجليدية، بنتيجة الانصهار بالضغط، كرافعه هيدروليكية أو كمزلق يساعد على

حركة الجليد فوق الصخور، باستثناء الجليديات القطبية حيث لا يحصل فيها إنصهار بالضغط وتبقى الجليدية ملتصقة بالقاعدة الصخرية. وهكذا فإن الحركة الإجمالية للجليد هي مجموع التلحق اللدن والانزلاق القاعدي كما هو واضح في الشكل (١٧-٥).



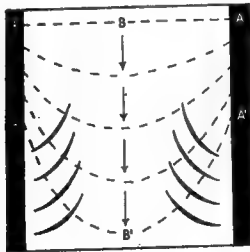
شكل ١٧.٥: رسم يوضح نمطي الحركة للجليديات، وهما الانزلاق على للصخور القاعدية والتلحق الداخلي.

ينجم من تلحق الجليديات الشقوق crevasses والهوة الجليدية Bergschrund.

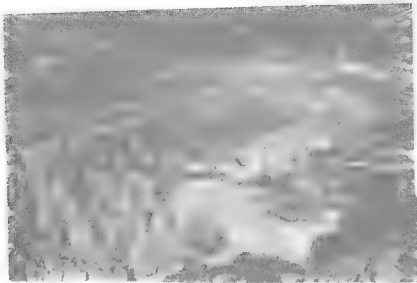
الشقوق: يكون للجليديات عادة قشرة خارجية تصل سماكتها أحياناً إلى نحو (٦٠) متراً، وغالباً تكون سماكتها أقل بكثير، وهي محمولة على القسم العميق من الجليدية

## ذات التدفق اللدن.

يتصف هذا القسم السطحي من الجليدية، بأنه يسلك سلوك الأجسام الصلبة الكسورة لعدم وجود ثقل عليه. ويظهر ذلك بشكل واضح عندما تتدفق الجليدية على سطح شديد الانحدار، مما يجعل الجليد السطحي خاضعاً لقوى شد فتيشق عرضانياً نتيجة التمدد على شكل ثغرات عميقة تعرف بالشقوق العرضانية *transverse crevasses*، حيث تتميز بشكل قاعها المحدب. وتشكل أيضاً شقوق هامشية، تنحج بصورة مائلة نحو حافة الجليدية وعاليها (شكل ١٨٥)، لاختلاف سرعة التدفق ما بين الوسط والجوانب. أما الشقوق الطولانية فتكون موازية لاتجاه تدفق الجليدية، وتشكل في الأجزاء العريضة منها نتيجة التدفق المنفرج. وكثيراً ما تقاطع هذه الشقوق في جميع الاتجاهات إذا ما اشتد انحدار الوادي الجليدي بصورة مفاجئة، ويتكون ما يسمى الشلال الجليدي *Icefall*، الذي تظهر عنده مجموعة من الشقوق الفائرة العميقة التي تؤدي إلى انفصال كتل ضخمة من الجليد، ويحدث التيهور *avalanches* الجليدي. وهي تلاحظ بشكل واضح في جليديات الوادي التي تنحدر من قمة مون بلان *Mont Blanc* في سويسرا. وفي فصل الصيف تجري المياه الناجمة من ذوبان الجليد على شكل جداول قصيرة تنحدر مياهها نحو الشقوق مشكلة ما يشبه البحيرات.







شكل ١٨٥: يوضح الشقوق الجليدية.  
 أ - رسم تخطيطي يبين تشكل الشقوق الهامشية نتيجة تفاوت السرعة.  
 ب - جليدية الرون في سويسرا تظهر فيها الشقوق العرضية.

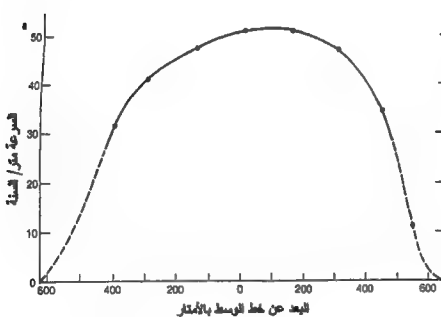
يوجد نمط خاص من الشقوق يعرف بأهوة الجليدية، فهي أهوة عميقة جداً وعريضة تكونت نتيجة انحدار اللسان الجليدي من جليدية الحلبات (شكل ١٩٥).



شكل ١٩٥: رسم تخطيطي يوضح تشكل الهوة الجليدية.

إن وجود الشقوق على سطح الجليدية هي ظاهرة أوجدتها حركة الجليديات، فهي صعبة العبور وخطرة جداً لعمقها، حتى إنها أحياناً تصل أعماقها إلى نحو (٥٠) متراً، وبخاصة بعد عاصفة ثلجية حيث تصبح الشقوق غبابة بواسطة الجسور الثلجية.

**معدلات التدفق Rates of flow:** يمكن قياس سرعة تدفق جليدية ما في وادٍ جليدي بتثبيت أعمدة مزاصفة عرضانياً على سطحها، وقياس مسافات تحركها خلال وحدة زمنية (شكل ٢٠٥). وقد أظهرت القياسات التي أجريت بهذه الطريقة أن الجزء المركزي من الجليدية يتدفق بسرعة أكبر منها في الجوانب، وأن توزع السرعة في المقطع العرضاني للجليدية يماثل توزع السرعة في التيار النهرى. ويعود ذلك إلى تزايد الاحتكاك تدريجياً باتجاه الجوانب حيث يصبح أعظمياً.



شكل ٢٠٥: توزع السرعة في المقطع العرضاني. تكون السرعة أكبر ما يمكن في وسط الجليد ثم تتناقص باتجاه هوامش الجليدية.

وقد لوحظ أيضاً تغير في سرعة التدفق من السطح باتجاه القاعدة الصخرية، التي تتحرك فوقها الجليدية، بواسطة حفر آبار تخترق الجليدية باتجاه شاقولي، ثم قياس تزايد ميلها عن الوضع الشاقولي بمقياس الميل *inclinometer*. وبمتابعة تكرار القياسات في أعماق مختلفة من هذه الآبار، يمكن تقدير سرعة التدفق الجليدي في كل سوية من هذه الآبار خلال سنة كاملة. وقد أظهرت القياسات التي سجلت في هذه الطريقة أن سرعة التدفق تتناقص باتجاه القاعدة الصخرية وباتجاه هوامش الجليدية.

عندما تكون الجليدية في حالة توازن فإن كمية الجليد المتدفق عبر مقطع عرضاني شاقولي في منطقة الزاكن، يجب أن تعادل كمية الثلوج المضافة إلى سطح الجليد. وبالوقت نفسه يجب أن تكون كمية الجليد المتدفقة عبر مقطع عرضاني شاقولي في منطقة الإزالة معادلة لكمية الجليد المزاح بالانصهار في نهاية الجليدية. لذلك يجب أيضاً أن يكون الجليد المتدفق في أي مقطع عرضاني متزايداً باتجاه الأسفل حتى خط التوازن، ثم يصبح متناقصاً بالابتعاد عنه نحو الأسفل. أي أن سرعة التدفق تكون أعظمية عند خط التوازن. وقد لوحظ وجود معدلات تدفق عالية في الأماكن التي تتحرك فيها الجليديات فوق جرف صخري حيث تشكل شلالات جليدية.

تتراوح سرعات التدفق في معظم الجليديات ما بين بضعة سنتيمترات إلى بضعة أمتار في اليوم. وربما تمضي مئات السنين حتى يصل الثلج الذي تساقط في منطقة الزاكن جليدية طويلة جداً إلى الكشف في مقدمة الجليدية. وقد أظهرت القياسات التي أجريت في الأجزاء الهامشية لغطائي جليد القطب الجنوبي، أن معدلات سرعة التدفق تقرب من (٥٠) متراً في السنة أو (١٥) سنتيمتراً باليوم.

### النشاط الجليدي Glaciation

تتميز أشكال الأراضي الواقعة في كندا وشمال الولايات المتحدة وشمال أوروبا عن غيرها من الأراضي بمظاهر تشير إلى أنها كانت في الماضي مسرحاً لنشاط الجليديات. ويشمل النشاط الجليدي عمليات حث ونقل وترسيب تؤدي إلى

تعديلات في أشكال سطح الأرض. وقد بقيت هذه التعديلات واضحة في هذه الأراضي، حيث لم تتمكن عمليات التحوية وتبدد الكتل والحت المائي من إزالة معالمها، وبقيت مظاهر هذه الأراضي بدون تغيير يُذكر منذ نهاية العصر الجليدي.

## ١- النقل الجليدي Glacial transport

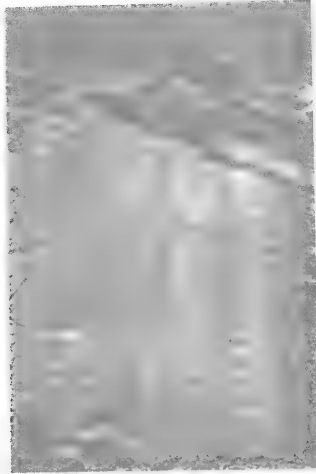
يختلف نقل المواد الرسوبية بالجليديات عن نقلها بالأنهار وذلك بطريقة حملها. فالجليديات تحمل جزءاً من حمولتها في داخلها وجزءاً آخر في مقدمتها وحواشيها الجانبية أو على سطحها، كما أنها قادرة على حمل ونقل قطع صخرية بحجوم وأوزان تفوق كثيراً ما يمكن أن تحمله التيارات النهرية. وتنقل الجليديات جميع المواد بمختلف أحجامها جنباً إلى جنب دون أن تفرزها حسب أحجامها وأوزانها. ومعظم حمولة الجليديات تتركز في قاعدتها، وهي نطاق التماس بين الجليد والقاعدة الصخرية، حيث يحصل السحب والحفر والاقتلاع. وتأتي معظم المواد الموجودة على سطح الجليدية من تراكم ما يتساقط عليها من جوانب الأودية والجروف الواقعة على جانبيها.

تتألف كمية كبيرة من الحمولة في قاعدة الجليديات من الرمل والسلت، حيث تكون حبيباتها غير مجوأة وذات أطراف حادة زاوية، وهي تمثل نتاج تحطيم الصخور وسحقها بالجليديات وتسمى الطحين الصخري rock flour. وهي تختلف عن الحبات الملونة الموجودة في رسوبات غير جليدية.

## الحت الجليدي: Glacial erosion

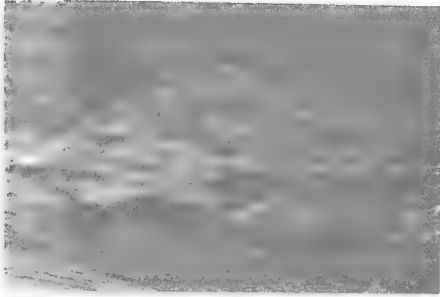
عندما تتحرك الجليديات فوق قواعدها الصخرية تقوم ببلور الحرات والمبرد والمزوجة، بفعل قوة ضغطها وثقلها وما تحمله من القطع والمواد الصخرية مختلفة الحجم، فهي تحسك بصخور القاعدة وتسحب سطوحها وتنحتها وتصقلها، وتشكل عليها تجزئات موازية لمسار الجليدية تعرف التجزئات الجليدية glacial strations. كما يمكن أن تحفر فيها أخاديد grooves طولانية موازية لهذه التجزئات (شكل ٢١-٥). كما يتطور على القطع الصخرية التي تكون بتماس مع القاع

سطوح مستوية تحوي تحزرات مشابهة.



شكل ٢١٥: صورة تبين الأخاليد ولتحتزرت على سطح للقاعدة الصخرية التي تشكلت نتيجة الحث الجليدي.

تلعب الجبيبات الرملية والسلتية الموجودة في قاعدة الجليدية دور ورق السمبادج sand paper بحيث تصقل السطوح الصخرية، وقد تجعلها ملساء ناعمة تعكس الضوء. وبالوقت نفسه فإن جر الجليدية فوق الصخور يؤدي إلى تحطيم كتل صخرية تكون عادة على طول الشقوق والفواصل وتقتلعها وترك في مكانها حفراً شكل (٢٢-٥).

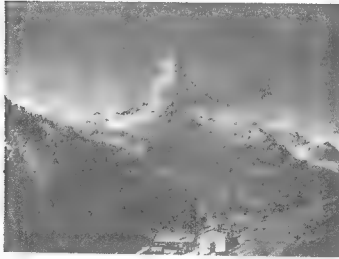


شكل ٢٢٠٥: تشكل الحفر على طول الشقوق واللفواصل.

### المظاهر الحتية في مناطق الجليديات الجبلية

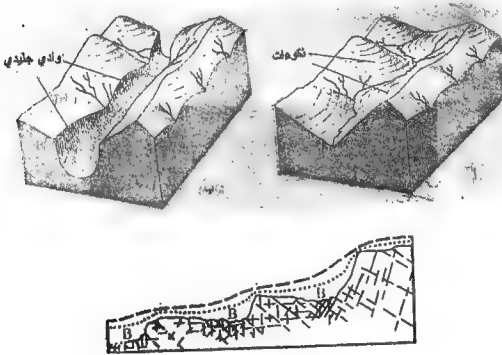
أ - الحلبات الجليدية والأشكال القريبة منها: تعود معظم الميزات الحتية لأعالي السلاسل الجبلية في كثير من أنحاء العالم إلى نشاط الجليديات. ففي مثل هذه المناطق توجد جملة من أشكال اليابسة التي تحمل طابع الحت الجليدي، ومن بين هذه الأشكال نذكر الحلبات cirques وهي على شكل حفر حوضية، تقع على جانب من الجبل، محاطة بمجروف صخرية شديدة الانحدار من ثلاثة جوانب، وتكون مفتوحة في جانبها السفلي.

تتأثر الجليبات عند بداية الوديان الجليدية. ويعتقد أنها كانت جوانب جبلية وعرة مخترق، مجوار، حفرتها المسيلات المائية، ونتيجة تعاقب التجمد والذوبان توسعت هذه الفجوات وانصل بعضها مع بعض. حيث تقوم الثلوج المتراكمة على توسيعها جانبياً نتيجة تعكك صخور هوامشها، ثم تعمل المياه الناجمة عن الذوبان على إزالة المواد التي تتساقط عند الهوامش، هذا بالإضافة على اشتداد تراكم الثلوج في وسط المنطقة الحوضية وحفرها باتجاه شاقولي. ويعتقد بعض الجيومورفولوجيين أن هذه الجليبات كانت أماكن لبحيرات جبلية صغيرة تعرف في اسكتلندا باسم تارن Tarn. وتشكل مع تزايد وجود هذه الجليبات وتطورها في الجوانب المتقابلة من الجبال قمم حادة هرمية الشكل تعرف بالقرون horns (شكل ٥-٢٤). وقد تستمر الجليبات المتجاورة في الاتساع، مما يؤدي إلى تشكل أنواع جبلية حادة serrate ridges تفصل بينهما. وهذه المظاهر مميزة بشكل واضح في جبال الألب. وهكذا تتميز القمم الجبلية في المناطق التي تتأثر بعمليات الحث الجليدي، بأنها قمم حادة تختلف تمام الاختلاف عن القمم والتضاريس المستديرة التي توجد في الأقاليم الرطبة.



شكل ٢٣.٥: قمة جبلية على شكل هرم في جبل المتزهورن Metterhorn في جبال الألب السويسرية.

ب - الوديان الجليدية **Glacial valleys**: تعد الوديان الجليدية بصورة عامة من أهم الظواهرات الجيومورفولوجية التي تتميز بها السلاسل الجبلية شاهقة الارتفاع. ومن المعروف أن معظم الأكنسة الجليدية تجري في أودية نهري قديمة حفرتها المياه الجارية. ثم تبدأ بتعميق أوديتها بضغط جليدها على القاع وبما تحمله من مواد مفتتة، مما يؤدي إلى شدة عمق هذه الأودية، وذلك لأن مقدرة الجليديات على الحث الشاقولي تفوق كثيراً مقدرتها على الحث الجانبي، ولهذا تتميز الأودية الجليدية بعمقها الكبير وبقلة اتساعها، بحيث يبدو المقطع العرضي على شكل حرف (U) اللاتيني. أما للمقطع الطولاني للوادي الجليدي، فهو مميز أيضاً بوجود تدرجات متتابعة غير نظامية تفصل بينهما أحواض قليلة العمق، يمكن أن تنسب إلى توسيع الشقوق والفواصل في الصخور القاعدية، أو اقتلاع كبير منها، وأحياناً ترجع إلى تغير النمط الصخري على امتداد الوادي الجليدي (شكل ص ٢٤).



شكل ص ٢٤ أ - مقطع عرضي لوادي نهري. ب - مقطع عرضي لوادي جليدي تشكل على حساب الوادي النهري. ج - مقطع طولاني لوادي جليدي. ويشير الخط المنقط إلى سطح الجليدية المتلاشية.



تتميز الوديان الجليدية بأنها أكثر استقامة من وديان الأنهار العادية، وذلك لأن الجليد جسم صلب لا يتبع في حركته منعطفات الوادي القديم، فإذا صادفته صخور نائمة في جوانب الوادي، فإنه يكسرها ويجرفها معه، وإن قابل لساناً صخرياً ممتداً من أحد الجوانب فإن يدأب في حته حتى يقضي عليه. كما تتميز هذه الوديان بكون أراضيها أخفض بكثير من الوديان التي ترافدها، والتي يتدفق منها الجليد إلى الوادي الرئيس على شكل شلال جليدي. ويصطلح على تسمية هذه الوديان الرفادة بالوديان المعلقة *hanging valleys*.

وقد تشغل الجليديات جميع أجزاء وديانها، بينما تشغل جليديات أخرى الأجزاء العليا من وديانها، بحيث يتاج المجال في سافلة هذه الوديان لنشاط عمليات تبدد الكتل وحت البحاري المائية، وغالباً تتوج عالية الوادي الجليدي حلبة جليدية أو مجموعة من الحلبات.

جـ - **الفجوردات Fjords**: وهي مداخل للبحر في اليابسة شديدة الانحدار. توجد في مناطق خطوط العرض العليا حيث تكون فيها الجبال متاحة للمحيطات، مثل النرويج والاسكا وكولومبيا البريطانية وشيلي ونيوزلندا.

يعتقد بعض المتخصصين في الدراسات الجليدية أن الفجوردات ما هي إلا أودية جليدية قديمة قد طغت عليها مياه البحر. كما يعتقد آخرون بأنها أودية جليدية استطاع الجليد أن يعمقها كثيراً إلى ما دون سطح البحر. إذ يمكن لجليدية شاطئية سماكتها (٣٠٠) متر ووزنها النوعي (٠,٩) أن تستمر بالحت تحت سطح البحر، حتى تصل إلى عمق (٢٧٠) متراً، وهو العمق الذي تبدأ فيه بالطفو. وبهذا يختلف حث الأنهار الجليدية عن الحث النهري، بأن عملياتها الحثية تستمر تحت البحر حتى تصل إلى أعماق تبدأ فيها بالطفو، بينما يتوقف الحث النهري عند وصول النهر إلى البحر.

د - **الصخور الغنمية Roches moutonnées**: وهي صخور نائمة في قاع الوادي الجليدي، تمتاز بسطحها الأملس وبشكلها المنحني الذي يشبه ظهور الغنم. وهي في

الأصل كتلة صخرية قاسية بارزة في قاع الوادي الجليدي، لم يستطع الجليد إزالتها فاندفع فوقها بقوة الضغط التي تحركه واحتك بها احتكاكاً قوياً، فإذا بلغ أعلى نقطة فيها انحدر عليها من جديد. ولذا يتميز سطح هذه الكتل الذي يواجه الجليد المتدفق، بانحداره القليل وسطحه الأملس المتحزز. أما السطح بعد الذروة فيتميز بانحداره الشديد وتجعده وعدم صفله (شكل ٢٥-٥). وتستعمل هذه الظاهرة حين وجودها لمعرفة اتجاه حركة الجليديات.



شكل ٢٥-٥: الصخور القديمة في سنترال بارك Central Park في مدينة نيويورك.

### رسوبات الجليديات:

تدعى جميع الرسوبات التي تتوضع مباشرة من الجليديات أو بشكل غير مباشر بواسطة مياه انصهارها المتدفقة في بحار مائية، أو المتجمعة في بحيرات، أو التي تتوضع مباشرة من الجبال الجليدية الطافية في البحار بالرسوبات المنحرفة drift sediments. وذلك لأن هذه الرسوبات انجرفت إلى مكانها الحالي بفعل الجليد بصرف النظر عن

طريقة أو مكان أو شكل تجمعها.

تتميز الرسوبات المنحرفة عن غيرها من الرسوبات بأنها تنحوت عن تفسير واقتلاع وسحج وسحق الصخور بواسطة الجليديات، ولا يوجد فيها أثر للتجوية الكيميائية. يمكن أن نميز في هذه الرسوبات نوعين رئيسيين وهما:

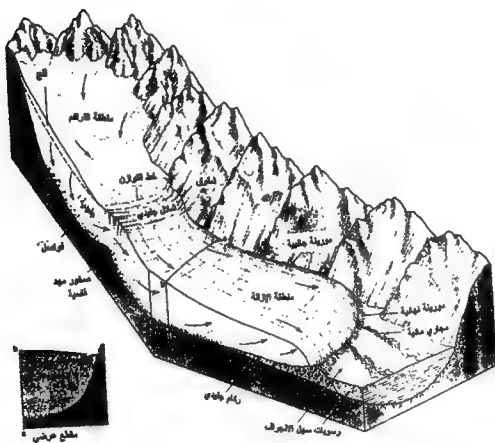
١- الركام الجليدي Till وهي رسوبات غير مطبقة وعلنية الفرز، مؤلفة من مواد تتراوح في حجمها من السلت والرمل إلى الحصى والجلاميد الصخرية الضخمة. ويظهر في معظم الأحوال على الحصى والجلاميد سطوح بري مستوية على شكل أوجه، يظهر عليها مجموعة أو أكثر من التحويزات الطولانية المتوازية، وقد تشكلت هذه الأوجه من تماس القطع الصخرية الموجودة في قاعدة الجليديات مع الصخور التي يتدفق فوقها الجليد. وجميع المواد الرسوبية الحصوية والأخشن منها والمتطاولة يكون لها توجيه، حيث يكون محورها الأعظمي مسير لاتجاه تدفق الجليدية.

٢- رسوبات مطبقة ترسبت من الماء الناجم من انصهار الجليديات.

## ١- الركام الجليدي

أ - المورينات **Morains**: وهي رسوبات ركامية تتوضع على امتداد جوانب وقاع ونهاية الجليديات ذات التدفق النشط (شكل ٢٦-٥). ويمكن أن نميز منها المورينات النهائية أو الجبهية **terminal morains**، التي تتراكم على امتداد مقدمة الجليدية عند تعرضها للذوبان. وتكون هلالية الشكل بسبب تحذب اللسان الجليدي، لتفاوت سرعته بين جزئه الأوسط والجوانب. ويكون لهذه الرسوبات الهلالية منخفض مركزي على شكل المدرج، يدل على مراحل تقهقر الجليدية. أما المورينات الأرضية **ground morains** فتتألف من الرواسب الهائلة التي تتركها الجليدية في قاع واديها بعد ذوبانها، وتتميز بأنها رسوبات شديدة النعومة بسبب طحنها بواسطة ثقل الجليدية وضغطها على القاع. أما الركام الجليدي الذي يتكون في جانبي الجليدية فيعرف بالمورينات الجانبية **lateral morains**. وتتألف مواد هذه

الرسوبات من الفتحات الصخرية التي تسقط من جدران الوادي الجليدي وجوانبه الناجمة من التحوية الميكانيكية. وقد يتشكل أحياناً بين المورينات الجانبية وحدار الوادي الجليدي بعض البحيرات الصغيرة. ويمكن أن ينجم من التحام جليديتين مورينات متوسطة medial morains، وتتميز بأن توزيعاتها تكون على شكل خطوط متوازية توجد في أسفل المرتفعات، وقد تُشكل أودية لجريان المياه الناجمة من اللهبان.



شكل ٢٦.٥: مقطع طولاني في جليدية الوداي يبين للمظاهر الرئيسة لها ورسوبياتها.

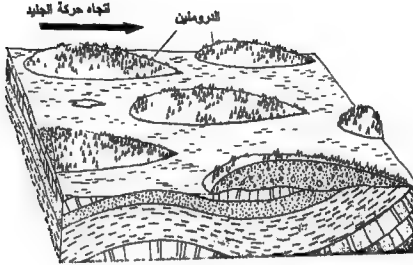
ب - الجلاميد **التائهة Erratic boulders**: قد تكون الجلاميد والكتل الصخرية الموجودة في رسوبات الركام الجليدي تنتمي إلى صخور المهد التي تستند إليها، إلا أن الكثير منها يكون منقولاً من مصادر بعيدة ومختلفاً تماماً عن الصخور الواقعة تحتها، لذلك توصف بالتائهة. وإن وجود هذه الكتل الصخرية التائهة كان من أول الظواهر التي أعتمد عليها في افراض وجود نشاط جليدي قديم. ولا تقع جميع الكتل والجلاميد التائهة دائماً ضمن رسوبات الركام. فبعضها موجود على سطح الأرض بشكل إفرادي، وقد يصل وزنها أحياناً إلى ألوف الأطنان، وحجم كهذه لا يمكن لأي تيار مائي أن ينقلها. ويلاحظ في بعض مناطق الجليديات القديمة وجود أعداد من الجلاميد التائهة التي تنتمي في أصلها إلى صخور مصدر مميزة، وعندما توضع أماكنها على الخرائط يلاحظ توزيعها بشكل مروحي رأسه في منطقة صخور المصدر، فهي تشير إلى مصدرها، كما يعكس توزيعها نمط تدفق الجليد القديم، إن مثل هذه المجموعات تميز باسم قافلة الجلاميد التائهة *erratic boulder trains*. وقد استفيد من توزيع قافلة الجلاميد التائهة في كندا في التتقيب عن التوضعات الفلزية الموجودة في صخور المصدر.

ح - **الدروملين Drumlin**: يكثر وجودها في المناطق المتاخمة للحواف الخارجية للغطاءات الجليدية القديمة. وتظهر على سطح الأرض في هيئة تلال انسيابية متوازية ببيضوية الشكل، تمتد محاورها الطويلة في اتجاه سير الجليدية.

يصل طول الدروملين إلى نحو الكيلومتر، ويتراوح ارتفاعها من (١٥-٥٠) متراً، ويواجه الجانب المنحدر لها اتجاه قدوم الجليدية، بينما يشير الجانب الأطول ذو الانحدار الأقل إلى اتجاه حركة الجليد شكل (٢٧-٥).

توجد الدروملين عادة في مجموعات تعرف بمحقول الدروملين *drumlin fields*. وإن إحدى هذه المجموعات الموجودة في روشيسستر في ولاية نيويورك تحتوي نحو (١٠,٠٠٠) دروملين. أما منشؤها فغير معروف، ولكن اصطفاها في اتجاه سير الجليدية ومظهرها الانسيابي يوحي بأنها تقولبت في نطاق التدفق اللدن ضمن جليدية متحركة. ويعتقد أن كثيراً منها تكون بتقدم الجليد فوق رسوبات متوضعة

سابقاً فحرفتها وقولبتها.



شكل ٢٧.٥: للدروملين: تبدو تتلقارية وذات شكل بيضوي إلى حد ما عندما ينظر إليها من الأعلى. بينما تبدو لا تتلقارية وذات جقب شديد الانحدار في اتجاه تقدم الجليدية.

#### د - الرسوبات الجليدية البحرية

وهي رسوبات جليدية توضع مباشرة من الجليد العائم في البحر، سواء أكان من الرفوف الجليدية أم من الجبال الجليدية. وهي تشبه رسوبات الركام الجليدي من ناحية تحررها من الجليد المنصهر وتراكمها المباشر، إلا أنها تختلف عنها في بعض الخصائص، فالخبات الصخرية المتطاولة توضع على قاع البحر بدون أي توجيه، كما يمكن أن تحتوي على مواد عضوية أو بقايا كائنات بحرية. وحيث يكثر انفصال الجبال الجليدية يرتفع معدل ترسيبها، وقد يؤدي ذلك إلى تشكل طبقة على قاع البحر. وحين تساقط هذه الرسوبات على قيعان بحرية ذات رسوبات ناعمة، فإن الحصى والجلاميد تنغرز فيها وتشوهها، ويطلق عليها اسم حجارة التساقط dropstones وهي من الظواهر المميزة للرسوبات الجليدية البحرية.

توجد رسوبات مشابهة للركام الجليدي وليس لها علاقة بالنشاط الجليدي، وهي رسوبات الكولوفيوم ورسوبات انزلاقات الأراضي. فقد تبدو لأول وهلة كأنها ركام جليدي من حيث انعدام التطبيق والفرز، ولكنها تخلو من الحصى والجلاميد ذات الأوجه المستوية المحززة بمجموعات من الخطوط المتوازية التي تميز الركام الجليدي.

## ٢- الرسوبات الجليدية المطبقة:

وهي رسوبات جليدية ترسب من المياه الجارية داخل الجليدية أو على سطحها أو في هوامشها، ومن تيارات المياه المتدفقة من مقدمة الجليدية. وتتميز هذه الرسوبات بتطبيقاتها وفرزها، وتراوح في أحجامها من مواد بحصى رملية إلى سلتية غضارية جيدة الفرز. ويعتقد أن هذه الرسوبات تشكلت في جليدية عديمة الحركة، حيث يحصل فيها انصهار سريع يؤدي إلى نقصان كبير في سماكة الجليدية. وتعمل المياه الناجمة من انصهار الجليد والتي تنساب من فوقه ومن تحته ويدخله إلى نقل المواد المقتة وتوضعها على شكل رسوبات مائية فوق أو داخل أو في هوامش الجليدية، وباستمرار انصهار الجليد وتراجعها تهبط هذه الرسوبات إلى القاعدة الصخرية وتعطي أشكالاً من الرسوبات المطبقة، وتكون على شكل تلال متنوعة في الشكل والحجم (شكل ٢٨٥) وتسمى هذه الرسوبات برسوبات الكيم *Kames sediments* ورسوبات الاسكرز *Eskers sediments*.

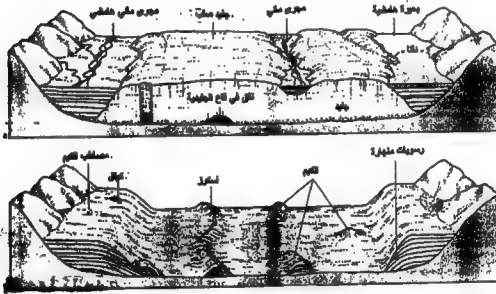
أ- رسوبات الكيم: وهي تلال منعزلة شديدة الانحدار موزعة بشكل عشوائي، يصل ارتفاعها إلى نحو (١٢) متراً، وتتألف من جلاميد وحصى ورمال وغضاريات.

تتكون الكيم في الحفر الموجودة على سطح جليدية عديمة الحركة أو في داخلها، حيث تصب فيها المياه الجارية الناجمة من الذوبان وتوضع حولتها على شكل رسوبات بحيرية مطبقة.

أما إذا كانت الجليدية من نوع جليديات الوديان، فتكون مصاطب على جانبي الوادي على شكل شريطين رسويين طبقيين ضيقين ما بين جدار الوادي والجليدية كما هو واضح في الشكل (٢٨٥).

ب- رسوبات الاسكرز: تظهر رسوبات الاسكرز على شكل تلال متعرجة يصل ارتفاعها إلى (١٥) متراً وأحياناً إلى (١٠٠) متر، وتمتد لمسافة تتراوح بين أجزاء الكيلومتر إلى بضع مئات من الكيلومترات.

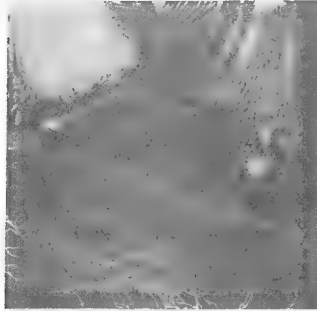
تتألف الاسكرز من رسوبات مطبقة من الرمل والحصى ذات شكل بيضوي أو مدورة مما يدل على أنها رسوبات جليدية حملتها مياه الأنهار التي كانت تجري تحت الجليدية أو في داخلها ثم أعادت توزيعها وقرتها. ويبدو أن تدفق مياه هذه الأنهار كان مضطرباً بشكل لا يسمح بتسوية المواد الفضائية.



شكل ٢٨٥: رسم تخطيطي يوضح تشكل الرسوبات المطبقة المتجمعة عن تصهار الجليدية.



حـ - رسوبات سهل الانجراف **Outwash plane deposits**: وهي مشتقة من الركام الجليدي جرفتها مياه الانصهار بعيداً عن الجليدية. فمجري هذه المياه تنقل كميات كبيرة من الركام الجليدي، فعندما تعبر هذه المجاري حاجز المورين النهائي تنخفض سرعتها فجأة، وترسب الجزء الأكبر من حمولتها السريرية البحصية والرملية، مما تضطر مياه المجاري المائية لأن تنقسم إلى شبكة من المجاري المائية عند تحركها من الجليدية (شكل ٣-١٨). لذلك نجد لهذه الرسوبات صفات مماثلة لصفات الرسوبات النهرية. وغالباً ما تكون حرة الحركة بحيث تشكل سهلاً من رسوبات الانجراف، ومثلها رسوبات الانجراف من الهوامش الخارجية للبقعة الجليدية في آيسلندا (شكل ٥-٢٩). وبالمقابل عندما تكون مياه انصهار الجليد تجري داخل وديان فإن رسوباتها تكون محصورة ضمن هذه الوديان بحيث تملؤها جزئياً. وعند تقهقر الجليدية تزداد كمية المياه المتدفقة وتبدأ بحث الرسوبات السابقة وبذلك تكشف عن مصاطب نهرية جليدية في الوديان التي شهدت تكرار النشاط الجليدي.



شكل ٥-٢٩: صورة جوية تُظهر مجاري مائية مضطربة في رسوبيات الانجراف في آيسلندا وقد شكلتها مياه ذوبان جليديتين متجاورتين.

تتميز بعض رسوبات سهل الانحراف ومصاطب الكيم بوجود منخفضات دائرية تعرف بالـ Kettle. ويعود تشكلها إلى انصهار كتلة ضخمة من الجليد كانت مغروزة في الرسوبات. وقد يصل قطر هذه المنخفضات إلى نحو (١٠) كيلو مترات في ولاية مينيسوتا Minnesota الأمريكية، كما يتراوح عمقها من (١٥-١٠) متراً. وفي كثير من الحالات تمتلئ هذه المنخفضات بالمياه وتتحول إلى بحيرات أو برك مائية إذا كانت قليلة العمق (شكل ٥-٢٨).

## أسباب تشكل الجليديات

تدل ملاحظة الجليديات الحالية ودراسة مظاهرها، على أن وجودها في الماضي كان أوسع نطاقاً مما هو عليه في الوقت الحاضر، كما تشير إلى أنها تقدمت وتراجعت عدة مرات خلال الزمن الجيولوجي الماضي. ورغم المعطيات الكثيرة المتوافرة فلا يمكننا التوصل إلى شرح تشكل الجليديات بشكل مقنع، إلا أنها يمكن أن تساعدنا اقتراح أسباب لتشكلها. فالسجل الجيولوجي يوفر لنا المفاهيم الأساسية التي يمكن الاعتماد عليها وأهمها التالي:

١- تطابق التشكل الجليدي مع مراحل تطور مساحات قارية واسعة ومرتفعة. فقد كانت القارات خلال معظم الزمن الجيولوجي أخفض مما هي عليه الآن، وأدى ذلك إلى حدوث تجاوزات بحار ضحلة فوق حواشيتها، ومثل هذه الشروط لا تلائم النشاط الجليدي.

ومنذ عدة ملايين من السنين وحتى الآن ازداد معدل ارتفاع القارات، حيث أصبح خلال الفترة الجليدية الأخيرة من البليستوسين أعلى بما يقرب من (٥٠٠) متر من معدل ارتفاعها خلال الكينوزوي الأوسط. وقد تزامنت عصور جليدية أخرى مع مراحل وجود قارات مرتفعة.

٢- لا يمكن أن ينسب التشكل الجليدي إلى التردد التدريجي طويل المدى للأرض، إذ إن العصور الجليدية الكبرى قد تحققت عدة مرات خلال الزمن الجيولوجي. وهذه الدورات من النشاط الجليدي قد تحققت بظروف غير عادية،

لأن المناخ العام للأرض كان خلال معظم الزمن الجيولوجي غير مناسب للجليديات.

٣- إن تقدم وتراجع الجليديات كان يحدث على نطاق عالمي. وقد دلت نتائج التأريخ بالكربون ( $C^{14}$ ) أن فترات تقدم الجليديات في أمريكا الشمالية هي نفسها في أوروبا. يضاف إلى ذلك الملاحظات التي تشير إلى تراجع عام في الجليديات يحدث في الوقت الحالي على نطاق العالم.

إن تطابق النشاط الجليدي مع تطور كتل قارية مرتفعة يستدعي الافتراض أن ارتفاع القارات هو السبب الرئيس في حدوث النشاط الجليدي، وهذا ما يتفق عليه معظم الباحثين. والتعليل بسيط جداً لأن البليستوسين مميز بحدوث أربع دورات جليدية على الأقل تتخللها فترات بين جليدية دافئة. فإذا كانت هذه الدورات الجليدية ناجمة من ارتفاع اليابسة، فإن ذلك يعني نهوض وهبوط القارات عدة مرات خلال فترة زمنية محدودة جداً ولا يوجد دليل على ذلك، وكل ما يمكن قوله هو أن العمليات الجيولوجية التي حدثت خلال ملايين من السنين، وأدت إلى رفع القارات ببطء قد أوصلت ارتفاعها إلى حد يجعل من تغيرات المناخ شروطاً مناسبة لتشكيل الجليديات، وحدثت فترات بين جليدية. فإذا كان ذلك صحيحاً فيجب أن نبحث بالإضافة إلى السبب الجيولوجي عن سبب مناخي يؤدي للتجلد. وبما السبب الرئيس المباشر لتشكيل الجليديات هو استمرار تساقط الثلوج حتى في أشهر فصل الصيف، أي تغير شروط أشهر الصيف لتصبح أكثر برودة وأكثر غيوماً. ففصول الشتاء ليست أكثر برودة مما هي عليه الآن، كما أن البرودة الزائدة لا تناسب تساقط الثلوج. وعلى ذلك يفترض في تشكيل الجليديات تحقق فصول صيفية زائدة البرودة والرطوبة.

أما تغيرات المناخ فيقترح لها عدة أسباب نذكر منها:

١- تغيرات في الطاقة الحرارية الشمسية.

٢- تغيرات في مقدار الطاقة الحرارية الشمسية التي تصل إلى سطح الأرض بعد

اختراق الغلاف الجوي.

٣- تغيرات في علاقة الأرض بالشمس.

٤- تغيرات في غط دوران الماء في البحار والمحيطات. مع العلم أن كل هذه الأسباب لا يمكن قبول واحد منها بشكل مقنع. لذلك يجب القول إن دراسة الجليديات تخلق مشكلة جيولوجية صعبة الحل.

، }

٠

# الفصل السادس

## الرياح والصحارى

إن الرياح والصحارى اسمان يقرن بعضهما مع بعض. وإن هذه العلاقة تُترجم أحياناً بأنها علاقة سبب وتأثير. فالصحارى هي مساحات جرداء أو تقريباً جرداء بسبب معدل الأمطار المنخفض، واليابسة مجردة من النباتات والرطوبة التي تمسك التربة، حيث تأتي عليها الرياح وتُعرّيها. وفي بعض الصحارى أمثلة نموذجية عن تأثيرات الرياح فيها، ومنها يمكن أن نكوّن فكرة عن الترابط بين الرياح والصحارى.

### أنواع الصحارى

يوجد ثلاثة أنواع من الصحارى، فالأول يعزى إلى حركة الرياح على الأرض، التي تحصل في أحزمة الضغط العالي في المناطق تحت المدارية، وتدعى غالباً بالصحارى المدارية tropical deserts. فالرياح في هذه المناطق تكون لها حركة هبوطية، ومع هبوطها تصبح ساخنة أكثر فأكثر وتصبح قادرة على حمل الرطوبة، ولكن هذه الرطوبة غير كافية لسقوط المطر. ولهذا فإن مناطق اليابسة الواقعة تحت مثل هذه الأحزمة الجوية تكون صحراوية. ومن أمثلتها صحراء كالاهاري

Kalahari في جنوب أفريقيا وصحارى أواسط استراليا وصحراء سوبوتان Sonoran في المكسيك والولايات المتحدة والصحراء العربية وصحراء التشيلي Chile والبيرو Peru.

أما النوع الثاني من الصحارى فهو صحارى ظل المطر rain - shadow deserts وهي أصغر من النوع الأول ومحلية، وتوجد حيث تحجز سلاسل الجبال الارتفاعات العالية الحاملة للمطر، وتدفعها للارتفاع إلى الأعلى، وهذا الصعود يجعلها في مجالات جوية باردة تؤدي إلى هطول حمولتها المطرية في جانب السلاسل الجبلية المقابلة للرياح، وتشكل ظل مطري في الطرف الآخر من هذه السلاسل. وإن صحارى الحوض العظيم Great Basin في نيفادا Nevada ويوتا Utah من هذا النوع، باعتبار أنها واقعة في جانب الظل المطري لسلسلة جبال سيرا نيفادا Sierra Nevada (شكل ١-٦).

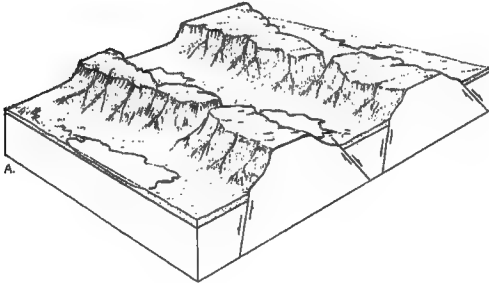


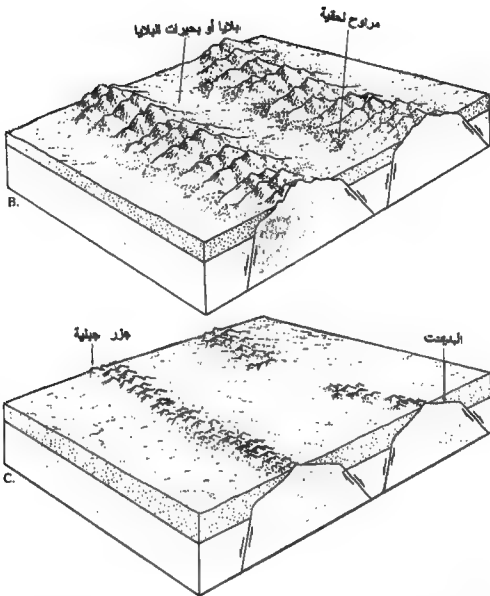
شكل ١-٦: يوضح تشكل صحارى ظل المطر في غرب الولايات المتحدة.

أما النمط الثالث من الصحارى فهو صحارى المناطق الموجودة داخل القارات، حيث تؤدي حرارة الصيف وجفاف الشتاء إلى انعدام الأمطار، مثالها صحارى أواسط آسيا مثل صحراء غوبي Gobi، حيث تمنع سلسلة جبال الهيمالايا رياح الصيف الموسمية المحملة بالهواء الرطب من المحيط الهندي من الوصول بعيداً داخل القارة.

## طبيعة غم الفية الصحارى Deserts topography

إن أهم سمّة في المناطق الصحراوية هي أن أنهارها لا تغادرها، إذ إن المعدل السنوي للتبخر والتسرب والمياه داخل الأرض تفرغ الأنهار من مياهها باستثناء نهري نيكولورادو والنيل، وكلاهما له تدفق كاف لتجاوز التبخر والتسرب، وكلاهما يصب في البحر. وتجدر الإشارة إلى أن منابع هذين النهرين تقع في مناطق جبلية مرتفعة ذات رطوبة عالية، فهما لا يمثلان الأنهار الصحراوية النموذجية. ونتيجة للجريان الداخلي internal drainage في المناطق الصحراوية، فإن متحبات التجوية لا تنقل وتبقى لتملأ الأماكن المنخفضة، وهذا ما يعطي المناطق الصحراوية مظاهرها المميزة، حيث نجد ذرى الجبال في مثل هذه المناطق ترتفع فوق سطوح ذات انحدارات لطيفة. ونحو مثال على ذلك نذكر الصحارى الجبلية الحوضية في بلاد المكسيك وغربي الولايات المتحدة. حيث يوجد ما يقارب مائتي سلسلة جبلية صغيرة يتراوح ارتفاعها من ٩٠٠م - ١٥٠٠م فوق مستوى الأحواض التي تفصل ما بينها (شكل ٦-٢).





شكل ٢-٦: مراحل تطور المظاهر الطبيعية في الجبال الصحراوية. لتتألف للتضاريس باستمرار صلبة  
 حت الجبال والترسيب في الأواض. A - مرحلة مبكرة. B - مرحلة متوسطة. C - مرحلة متأخرة.

نلاحظ من الشكل أن بعد مرحلة نهوض السلاسل الجبلية، تتساقط الأمطار  
 على السفوح حافرة لنفسها مجاري عميقة (خنادق)، والمواد التي يتم حثها تحمل  
 بالمياه وتوضعها عند مخارجها من المنطقة الجبلية مشكلة مراوح لحقبة *alluvial fans*



تتوزع فيها الحطاميات على شكل مثلث رأسه عالية الخنادق وقاعدته نحو الأسفل ومع مرور الزمن يمكن للمراوح اللحيقية المتجاورة أن تتوسع وتتلاقى لتشكّل غطاءً حصوياً واسعاً يصرف بالباهادا Bajada، ونادراً ما تكون المياه كافية لتخترق الباهادا إلى وسط الحوض.

ولكن أحياناً تؤدي الأمطار الموسمية التي تهطل بغزارة لفترات قصيرة، إلى توافر كميات من المياه الجارية كافية لأن تخترق الباهادا، وتتجمع في بعض المنخفضات لتشكّل بحيرات البلايا Playa lakes، وتكون ضحلة ومؤقتة تدوم بضعة أيام أو بضعة أسابيع. وتترك هذه البحيرات بعد جفافها رسوبات تتألف من السلت والغضار التي حملتها المياه من الباهادا. ويحدث هذا حين يكون قاع البحيرة نفوذاً. أما حين يكون كثيفاً فإن مياه البحيرة تبقى فترة أطول لتعرض للجفاف بالتبخر تاركة رسوبات ملحية.

وبعد مرور أزمة حثية طويلة مع ما يرافقها من عمليات ترسيبية، فإن التضاريس تستمر في الاضمحلال شيئاً فشيئاً، وتصبح الجبال المدفونة تحت أنقاضها، ولا يظهر منها سوى تنوعات صخرية كبيرة وسط أراضي قليلة الانحدار وتعرف بالجزر الجبلية Iselberg.

حين نتصور مقطعاً يمر من قمم الجبال إلى الأراضي المنخفضة، نجد أنه يتألف من ذرى حادة (الجبال المدفونة) وذات الانحدار يتراوح بين ١٥ درجة و ٦٠ درجة، وكثيراً ما يبدو على شكل حرف رأسي. ثم يليه سفح جبلي ذو انحدار متدرج يتراوح بين نصف درجة وسبع درجات. وفي واقع الأمر يتألف هذا السطح الجبلي من قسمين: قسم علوي تكون بفعل عوامل الحث ويعرف بالبدمنت pediment، ويبدو على شكل مقعر إذا نظرنا إليه من منطقة الحوض، وكثيراً ما يغطي هذا القسم طبقة رقيقة من الرسوبات المولفة من الجلاميد والحصى. ويعود الشكل المقعر إلى أن مياه السيول التي تنحدر على سفوح المرتفعات لها قدرة كبيرة على الحث لسرعة تلحقها وما تحمله من مواد مفتة. ويؤدي هذا إلى حث هذه السفوح واعطائها الشكل المقعر الذي يميز البدمنت. أما القسم السفلي فتكون بفعل عملية الترسيب وهو الباهادا الذي ينتهي إلى البلايا.

## الفعل الجيولوجي للرياح

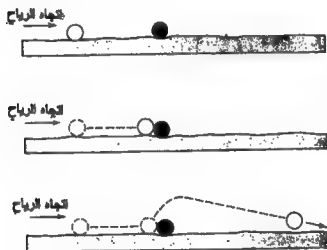
لا بد في مجال دراسة الغلاف الجوي من الاهتمام بالرياح كعامل جيولوجي حثي وترسيبي. ويمكن ملاحظة ذلك حين مرور عاصفة غبار، أو حين رؤية عصف رملي حملته هبة رياح قوية، أو ترسيب كميات كبيرة من المواد الغبارية والرملية. يشمل الفعل الجيولوجي للرياح عمليات النقل والبري (أو الحث) والترسيب.

### نقل الرياح للرسوبات

تستطيع الرياح المتحركة رفع المواد الحطامية غير المتماسكة، ونقلها من مكان لآخر، وتزيد سرعتها كلما زاد ارتفاعها عن سطح الأرض، فهي تنقل المواد الخشنة على شكل جمولة أرضية bed load، والمواد الناعمة على شكل معلقات. وإن نقل الرسوبات بوساطة الرياح يختلف عن نقلها بوساطة المياه الجارية. فالرياح ذات كثافة أقل من الماء، لذلك تكون قدرتها على نقل المواد الخشنة أقل، وإن حركتها غير محددة بأقنية، فهي تنتشر على مساحات واسعة وارتفاعات مختلفة في الغلاف الجوي.

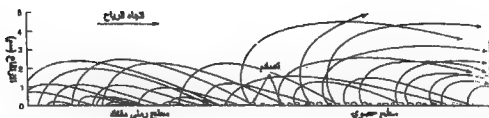
آ = الحمولة الأرضية: تتحرك الرياح عادة بشكل مضطرب، فهي تتحرك للأعلى وللأسفل وبالاتجاهات الجانبية، وإلى الأمام والخلف بشكل عشوائي. ويساعد هذا الاضطراب على تحريك الحبات الحطامية، فالحبات الكبيرة أو ذات

الكثافة العالية تتحرك بملامسة السطح بالدرجة، والحبات الرملية تنتقل بواسطة القفز saltation على السطح. وقد أظهرت التجارب المخبرية التي أجريت على رمال تحركها تيارات هوائية ضمن أنفاق زجاجية، أن حبات الرمل تتحرك في مسارات منحنية. فقد وجد أن حبيبات الرمل تبدأ بالحركة عند وصول الرياح إلى سرعة تكفي للتغلب على عطالتها inertia، فتتدحرج على الأرض حتى تصطدم بحبة أخرى وتؤدي إلى قفزها بالهواء، وتدفعها الرياح إلى الأمام إلى أن تهبط ثانية بفعل الثقالة gravity. فعند اصطدامها بالأرض إما أن ترتد ثانية في الهواء أو تضرب بحبات أخرى تؤدي إلى قفزها في الهواء (شكل ٦-٣).



شكل ٦-٣: يوضح مراحل رفع الحبيبات الرملية بالرياح.

وهكذا في وقت قصير تبدأ سلسلة من القفزات لتدفع بكمية كبيرة من الرمال إلى الحركة، مشكلة سحابة من الرمال بالقرب من سطح الأرض (شكل ٦-٤).



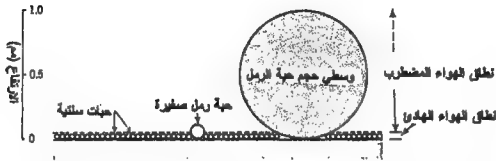
شكل ٤.٦: الحركات الدورية لحبات الرمل.

دلت الملاحظات المخيرة والحقيقية أن حبات الرمل المتنقلة بالقفز لا تنقل بعيداً عن سطح الأرض. ففي المناطق الصحراوية والظروف العادية ترتفع الحبات إلى نحو نصف متر، أما في حالة الرياح القوية جداً، فإن ارتفاعها لا يتعدى المتر، هذا كما دلت عليه آثار الحت الريحي في أعمدة الأسوار والأعمدة الكهربائية، وأعمدة الأتار التي تقع في نطاق المناطق المعروفة بأحواض الغبار dust bowls<sup>(١)</sup>.

**ب - الحمولة المعلقة Suspended load:** تشمل المواد الغبارية الناعمة كالسليست والغضار، التي تحركها الرياح وتحملها على شكل معلقات إلى ارتفاعات تصل إلى عدة آلاف من الأمتار في الغلاف الجوي. وقد تبقى معلقة لمدة طويلة نسبياً، وذلك لأن الغبار بصورة عامة يتكون من جزيئات مفلطحة ذات مساحة سطحية كبيرة بالنسبة إلى وزنها، وإن اضطراب الهواء يعمل على معادلة قوة الثقالة، مما يؤدي إلى بقائها معلقة في الهواء. وتكون سرعة تحركها قرب سطح الأرض بطيئة جداً. وتعتمد بعلامسة السطح لوجود نطاق رقيق من الهواء الراكد بمحاذاة السطح تبلغ سماكته ميلاً أو أقل، وتتغير هذه السماكة حسب وجود العوائق كالحجارة والنباتات، مما يؤمن للمواد المعلقة الغضارية والسليسية نطاقاً هادئاً

(١) منطقة كثيرة الجفاف والعواصف الغبارية.

يسمح باستقرارها (شكل ٥-٦). وهنا لا تستطيع الرياح وحدها رفع هذه المواد دون الاعتماد على الرمال القافزة، أو أي عامل آخر يحركها. وهذا ما يلاحظ في يوم عاصف في منطقة جافة، إن كمية الغبار المتحركة لا تذكر إذا تركت وشأنها. ولكن عند مرور عربة أو سيارة فإنها تثير سحابة كثيفة من الغبار.



شكل ٥-٦: تشكل حبيبات الملتصقة سطحاً رقيقاً ضمن الطبقة الهوائية السفلى، التي سببتها حبات الرمل وغيرها من العوائق. ولا يتجاوز سمكها  $\frac{1}{3}$  من القطر الوسطي لحبات الرمل.

بالرغم من أن المواد المعلقة تتوضع عادة بالقرب من مصادرها. إلا أن الرياح القوية قادرة على نقل كميات كبيرة من المواد الغبارية لمسافات بعيدة. وأحسن مثال لذلك عواصف الثلاثينيات من هذا القرن، التي اجتاحت وسط الولايات المتحدة. فقد قدرت الحمولة الغبارية التي كانت عالقة بالجو بـ  $35,000$  طن/كم<sup>3</sup>، ووصلت لارتفاع نحو  $3,6$  كم فوق سطح الأرض، ونقلتها الرياح بعيداً عن مصادرها بمسافة تقدر بـ  $3000$  كم (شكل ٦-٦).



شكل ٦-٦: عاصلة غبارية اجتاحت وسط الولايات المتحدة في ٢١ مايو عام ١٩٣٧. وقد دامت هذه السحابة الغبارية السوداء لمدة ثلاثين دقيقة.

### الحت الريحي Wind erosion

تعد الرياح أكثر العوامل إسهاماً في تشكيل سطح الأراضي في المناطق الصحراوية وشبه الصحراوية، وبما يساعد هذا العامل على الحت هو ندرة النبات وقلة رطوبة الهواء. ولكن يجب أن لا ننسى أن المياه الجارية على الرغم من ضالتها تشترك بنصيب لا بأس به في تغيير معالم سطح الأرض في الأقاليم الصحراوية. يتمثل العمل الحثي للرياح بطريقتين هما: التذرية deflation والبري abrasion.

#### أ - التذرية

هي عملية رفع وإزالة الفتات من سطح الأرض تمهيداً لنقلها، وقد لا تلاحظ آثار الحت بالتذرية، لأن رفع وإزالة المواد يتم من السطح بكامله في آن واحد. فمثلاً العواصف التي اجتاحت غرب الولايات المتحدة في الثلاثينيات من هذا القرن،

أدت إلى انخفاض السطح بمقدار متر واحد خلال بضع سنوات (شكل ٧-٦).



شكل ٧-٦: أكمة من التربة للقبعة، تشير إلى وضعية سطح الأرض قبل تأثير التذرية. وقد قامت هذرات للتبات بحماية للتربة للقبعة من عمل للرياح للحتي.

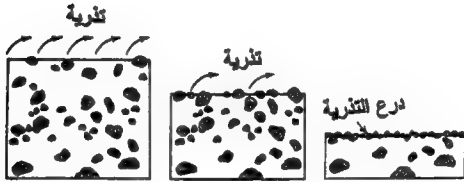
بما أن الرمال تتحرك بالقفز، وتكون على مقربة من سطح الأرض، فإن اصطدامها بالأرض يعد عاملاً مهماً في الحت، وينتج عن ذلك تكوين منخفضات في الصخور غير المتماسكة تعرف بأحواض النفخ *blowout basins*.

إن من أكثر الدلائل وضوحاً على تذرية الرياح وجود آلاف من الأحواض، التي حفرتها الرياح في السهول العظمى *Great Plains* في شمال أمريكا.

تأخذ هذه الأحواض أشكالاً طويلة باتجاه الرياح، وقد يصل امتدادها إلى نحو كيلو مترين، أما عمقها فيتراوح من متر إلى مترين. تغطي منطقة الأحواض هذه رسوبات لحقية يمكن تذريتها بسهولة، إلا أن عمل التذرية فيها لا ينشط إلا في السنوات الجافة، أما في السنوات الرطبة فتغطيها الأعشاب وتحميها. أما الأحواض التي تتشكل في المناطق الجافة فتصل إلى أعماق أكبر، كما هو الحال في منخفض القطارة *Qattara Depression* في الصحراء الليبية المصرية حيث يصل عمقه إلى

(١٠٠) متر تحت سطح البحر.

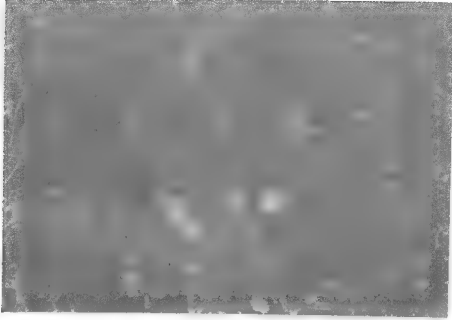
إن العمل الحثي للتذرية يستمر في حفر الأحواض وتعميقها حتى يصل إلى منسوب الماء الجوي، حيث تمهد الرطوبة ونمو الأعشاب من استمرار عملية الحث. وكذلك تطور غطاء من الحصى كبيرة الحجم نتيجة التذرية يقف عائلاً أمام الحث، فالرياح تستطيع أن تنقل المواد الغبارية والرمل من السطح، وتترك وراءها المواد الأكبر حجماً، وبمرور الزمن يتشكل غطاء واقٍ من قطع صخرية مزواة، يحمي سطح الأرض من استمرار عملية الحث يعرف بدرع التذرية deflation armor (شكل ٨-٦).



شكل ٨-٦: ثلاث مراحل من تطور درع التذرية.

تعرف أحياناً هذه الطبقة السطحية برصيف الصحراء desert pavement، لأن رفع المواد الناعمة بشكل مستمر بواسطة الرياح يجعل الحصى في أوضاع مستقرة وملائمة لتزصف بجانب بعضها بعضاً (شكل ٩-٦).



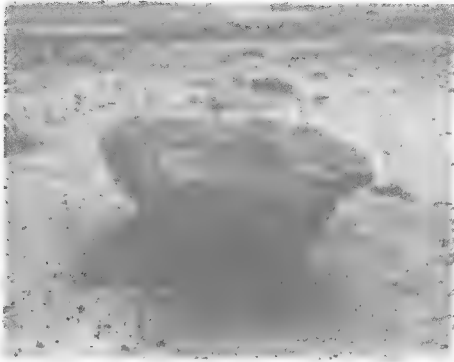


شكل ٩-٦: رصيف الصحراء يتكون من حصي ملوئ.

## ب - البري

تتوقف عملية بري الصخور على سرعة الرياح وما تحمله من مواد مفتتة من جهة وطبيعة الصخور ووضع الطبقات من جهة ثانية.

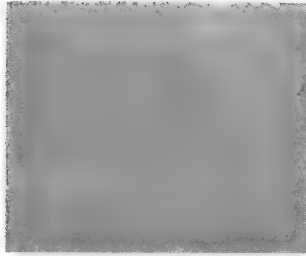
يتم البري من ضرب الحبات الرملية القافزة التي تحركها الرياح. ومن النادر أن ترتفع الحبات الرملية القافزة لأكثر من متر واحد فوق سطح الأرض، وعادة يبقى معظمها متحركاً في نصف المتر السفلي. لذلك يكون معظم الفعل الحي للعصف الرمي sand blasting محصوراً ضمن نطاق لا يزيد ارتفاعه على سطح الأرض أكثر من نصف متر. ويؤدي بري الصخور إلى تشكيل هياكل صحراوية مميزة مثل الموائد الصحراوية والسطوح الصخرية المقعرة، والاهتراء في الأجزاء السفلية من الجدران الصخرية والأعمدة والآثار القديمة.



شكل ١٠٦: يوضح تشكل الموالد للصخرية في صفور غرائبية. نتيجة بري الرياح لأجزاءها السفلية.

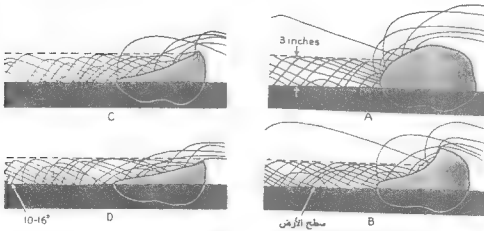
**الموالد الصخرية:** عندما تصطدم الرياح المحملة بالرمال بأرض صخرية ناتئة مؤلفة من طبقات أفقية متفاوتة في قساوتها، فإن حث الطبقات اللينة يكون بنسبة أكبر من الطبقات القاسية، فيتكون نتيجة لذلك صخور ارتكازية *pedestal rocks* قاسية تتركز على صخور لينة تأخذ شكل نبات الفطر وتعرف عادة بالموالد الصخرية (شكل ١٠٦).

**البادانج Yardangs:** وهي مرتفعات متطاولة ومتوازية مؤلفة من صخور رسوبية قاسية، ويكون لها شكل قارب مقلوب، يصل امتدادها إلى عشرات الكيلومترات وترتفع إلى نحو (١٠٠) متر. وتوجد عادة في مجموعات وتشكل في مناطق صحراوية مؤلفة من طبقات مائلة متفاوتة في قساوتها، فتتشكل نتيجة الحث الريحي المتفاوت خنادق عميقة تحفر في الصخور اللينة تفصلها أعراف حادة ذات أشكال غريبة (شكل ١١٦). تعرف هذه الأشكال في الصحراء الآسيوية بالبادانج.



شكل ١١٠٦: البيردالنج.

من الحقائق المعروفة أن الحصى في المناطق الصحراوية تكون ملساء ومنقرة وذات حواف حادة ومتعددة الأوجه. وهذا يعود إلى اصطدام الرمال المحمولة بالرياح لها، وبري الوجه المقابل للرياح وجعله مدوراً ومنقراً (شكل ٦-١٢).



شكل ١٢٠٦: مراحل بري الرياح للحصى الصحراوية.

وقد يكون للحصى أكثر من وجه مصقول وذلك لتغيير اتجاه الرياح، أو لانقلاب الحصى لسحب الرمال من تحتها بفعل التذرية (شكل ١٣-٦).



شكل ١٣-٦: الأشكال المختلفة للحصى للريحية.

## الرسوبات الريحية

تلعب الرياح دوراً مهماً في الترسيب في المناطق الجافة والسواحل الرملية في العالم. وهي تقوم بدور كبير في فرز المواد الخشنة عن الناعمة، وينتج من عملية الفرز sorting نوعان من الرسوبات وهما: الرسوبات الرملية ورسوبات اللوس.

### ١- الرسوبات الرملية

عندما تنخفض سرعة الرياح تنخفض قدرتها على حمل المواد ونقلها، وعندها تبدأ عملية الترسيب. وتعتمد هذه العملية والظواهر المختلفة الناتجة منها على حجم وكمية المواد المنقولة وعلى وجود النباتات وعلى اتجاه هبوب الرياح. وبصورة عامة

نميز بين نوعين من الرسوبات الرملية:

أ - رسوبات ذات أهمية محدودة وتنتشر على نطاق ضيق مثل التموجات الرملية.

ب - رسوبات تظهر على نطاق واسع في المناطق الصحراوية. وتمثل بالكيبان الرملية بأشكالها المختلفة.

أ - التموجات الرملية **Sand ripples**: وهي غطاءات من الرمال المفروزة بشكل جيد. وتمثل في تموجات ripples أو حافات ridges تظهر بين حين وآخر على سطح الرسوبات الرملية. وتتكون في المناطق التي تكون فيها الرمال غزيرة والرياح منخفضة السرعة. حيث تنتقل الرمال الناعمة بالقفز تاركة وراءها الرمال الخشنة، وباستمرار قفز الحبات الناعمة تتطور تموجات أو حافات من الرمال الخشنة وتكون عمودية على اتجاه هبوب الرياح (شكل ٦-١٤). ولكن لا تلبث أن تتلاشى في حالة وجود رياح قوية وتختلط الرمال الناعمة بالخشنة. وليس لمثل هذه الرسوبات أية دلالة جيولوجية.



شكل ٦-١٤: التموجات الرملية

ب - الكتيبان الرملية عندما تصطدم الرياح المحملة بالرمال بعائق كصخرة أو شجرة فإنها تلتف حوله وأمامه تاركة نطاق ظل خلفه، ونطاق ظل أصغر أمامه، حيث تتحرك الرياح فيهما بشكل دوامات وبسرعة أقل مما حولها (شكل ٦-١٥). وبانخفاض سرعتها تنخفض طاقتها على حمل الرمال وتوضعها في نطاق الظل، ومع زيادة الزوايا ينظم العائق ويتشكل حاجز في طريق الرياح، وباستمرار هبوب الرياح ووجود مصدر كافٍ للرمال، تترسب الرمال أمام وعطف الحاجز مشكلة كتيباً رملياً.



شكل ١٥٦: تشكل للكتيب الرمي.

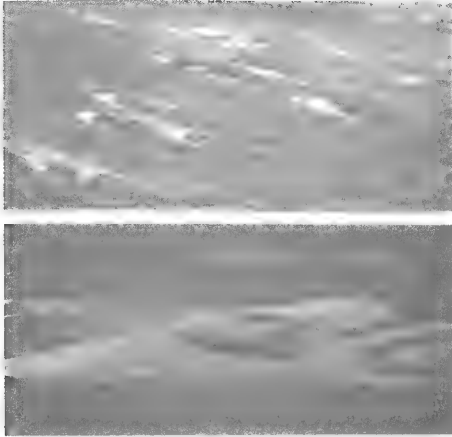
يأخذ الكتيب الرمي شكلاً غير متناظر، إذ يكون له انحدار خفيف في اتجاه الرياح من (٥-١٢) درجة، وأشد انحداراً في الجانب المعاكس. حيث تتحرك الرمال صاعدة الجانب المقابل للرياح بالقفز، وبعد القمة مباشرة تنخفض سرعة الرياح وتسقط الرمال في الجانب الآخر وتتراكم عليه بانحدار يقرب من (٣٤) درجة، وهي زاوية الاستقرار للرمال غير المتماسكة، ويعرف هذا الجانب بوجه الانزلاق slip face. وهو يشير إلى اتجاه الرياح التي شكلت الكتيب. وباستمرار تراكم الرمال وانزلاق بعضها على هذا الوجه يؤدي إلى حجرة الكتيب في اتجاه حركة الرياح (شكل ٦-١٦).



كما هو واضح في الشكل عندما ترمب الرمال على وجه الانزلاق شكلت طبقات تميل في اتجاه هبوب الرياح. تعرف هذه الطبقات المنحدرة بالطبقات المتقاطعة cross beds. وعندما تدفن الكتيان تحت طبقات أخرى وتصبح جزءاً من الصخور الرسوبية، فإن شكلها اللاتناظري يزول ولكن تبقى الطبقات المتقاطعة. ومن دراسة توجه هذه الطبقات يمكن للجيولوجيين تحديد اتجاه التيارات الريحية التي شكلت الكتيان الرملية. وتستعمل هذه المعلومات مع معطيات أخرى لمعرفة المناخ خلال الزمن الجيولوجي الذي تشكلت فيه هذه الكتيان، وهذه بدورها تساعد على تحديد مواقع صفائح الغلاف الصخري في تلك الفترة.

### أنواع الكفبان الرملية:

أ - الكهبان الهلالية: عندما تمتدذ الكهبان أشكالاً هلالية تعرف بالبرعانات Barchans، وتكون على شكل هلال يتجه جانبه المخدب إلى الجهة التي تأتي منها الرياح، كما يتجه طرفاه إلى الجهة التي تسير نحوها الرياح (شكل ٦-١٧). وكثيراً ما يتغير الشكل الهلالي إذا ما حدث أيُّ تغير في اتجاه الرياح، أو كانت المياه الجوفية قريبة من السطح، مما يساعد على نمو النباتات في أطرافها وتثبيتها، وعندما تتركز قوة الرياح في الجزء الأوسط وقد ينقسم إلى قسمين منفصلين يتحول كل منهما إلى رابية شبه مخروطية من الرمال.



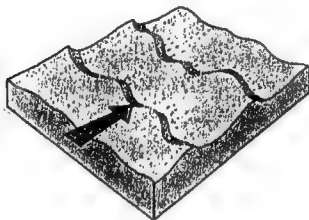
شكل ١٧-٦: صورة تُظهر الكثبان الهلالية (البرخانات)، يكون الانحدار اللطيف في اتجاه هبوب الرياح.

تتشكل البرخانات في المناطق المنبسطة وغير المغطاة بغطاء نباتي، والتي يكون فيها مصدر الرمال محدوداً، وتهاجر ببطء في اتجاه الرياح بمعدل يصل إلى (١٥) متراً في السنة، وهي بصورة عامة متوسطة الحجم وقد يصل أكبر ارتفاع لها نحو (٣٠) متراً وأقصى اتساع بين رأسها نحو (٣٠٠) متر.



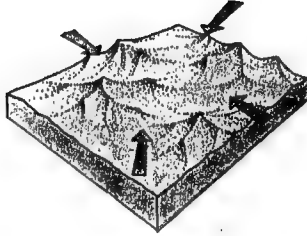
ب - الكثبان الطولية: وتعرف أحياناً بكثبان السيف *seif dunes*. وهي تلال طولية من الرمال تمتد موازية لاتجاه الرياح. وتتكون في المناطق التي تكثر فيها الرياح وتكون رمالها قليلة.

ج - الكثبان العرضية: تتشكل في المناطق التي تكون فيها الرياح قوية ومصدراً كافياً للرمال. فهي تشبه البرخانات إلا أنها تكون ملتوية، وتكون الكثبان في سلسلة طويلة على هيئة تلال تفصلها أغوار في اتجاه عمودي على اتجاه الرياح. وتكون معظم الكثبان الشاطئية من هذا النوع (شكل ٦-١٨).



شكل ٦-١٨: الكثبان العرضية. يشير السهم إلى اتجاه هبوب الرياح.

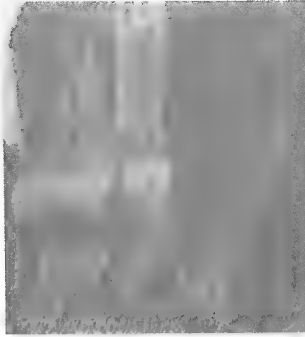
د - الكثبان النجمية *star dunes*: وهي هضبة منفردة من الرمال، تتألف من مجموعة من الحافات تتفرع من قمة مرتفعة باتجاه أسفل الهضبة، وقد يصل ارتفاع قممها إلى نحو (١٠٠) متر. يتشكل هذا النمط من الكثبان في المناطق التي تهب فيها الرياح من جميع الجهات شكل (٦-١٩).



شكل ١٩٦: اللطبان للنجمة. تشير الأسهم إلى اتجاه هبوب الرياح

## ٢- رسوبات اللوس Loess deposits

يطلق اسم اللوس على رسوبات ريحية غير متماسكة، يميل لونها إلى الرمادي أو الأصفر، وذات ملمس طحييني. تتألف من حبيبات ناعمة جداً من السلت والغضار. تكون رسوبات اللوس عادة عديمة التطبق، وتظهر تكسفاتاتها على شكل مقاطع شاقولية تتوضح على جانبي شق الطرقات (شكل ٦-٢٠). وإن هذا الميل لبقاء التكشف بالمحدرات شديدة، قد يكون نتاج التجاذب الكهربائي بين الحبيبات الناعمة، أو من تشكل ملاط كلسي ضعيف أو من تضافر كليهما.



شكل ٢٠٦: تظهر تكشفات اللوس على شكل جدران صودية.

يتألف اللوس عادة من الكوارتز والفلدسبار والمورنبلاند والميكا والكالسيت وفلزات غضارية. وتكون جيبياتها زاوية الأطراف، مما يؤدي إلى تشكل مسامية مفتوحة تصل إلى ٥٠٪. وإن وجود الماء مع المواد الفلزية المتنوعة يجعل ترب اللوس خصبة جداً. أما الصفات التي تشير إلى الأصل الريحي لترب اللوس فهي:

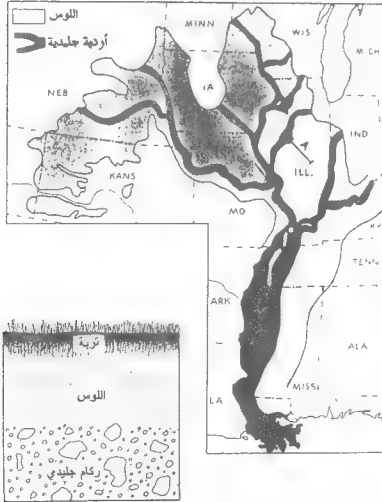
- ١- وجود مستحاثات لنباتات كانت تعيش على اليابسة، وكذلك وجود مستحاثات حيوانية ذات تنفس هوائي مثل الحلزون وبقايا الثور الوحشي والجمال والفيل.
- ٢- تشكل غطاءات لطبوغرافية غير نظامية، حيث توجد في المنحدرات والوديان والسهول، مما يدل على أنها ترسبت من الهواء مباشرة.

مصادر ترب اللوس: اعتماداً على الدراسات التي أجريت على تراكبات اللوس في الولايات المتحدة وفي شمال وغرب الصين، تبين أن اللوس مصدرين رئيسين وهما

## المناطق الصحراوية والمناطق الجليدية.

يعد اللوس الموجود في الولايات المتحدة وفي شمال فرنسا والحدود الشمالية الغربية للألب من نتاج غير مباشر للجليديات. وقد بينت الدراسات التي تمت في الولايات المتحدة الحقائق التالية:

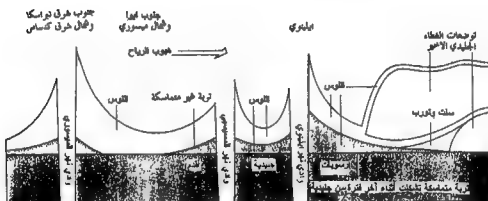
- ١- يتألف اللوس من مواد ناعمة جداً تشبه الطحين الصخري.
- ٢- تشير تكشفات اللوس في وسط وشمال الولايات المتحدة أنه توضع مباشرة فوق الركام الجليدي قبل تعرضه للتجوية الكيميائية (شكل ٦-٢١). وهذا يدل على أن رسوبات اللوس أتت من مصادر قريبة.



شكل ٢١-٦: أ- توزيع اللوس في وسط وشمال الولايات المتحدة.

ب- توضع اللوس مباشرة فوق الركام الجليدي غير المجوى.

٤- اختراق الأنهار لتوضعات اللوس في الجزء المركزي من الولايات المتحدة  
كما هو واضح في الشكل (٦-٢١).



يمكن تفسير الظواهر السابقة بما يلي:

فأثناء العصر الجليدي البليستوسيني، نقلت الأنهار كميات كبيرة من المواد الجليدية، مما أدى إلى تشكيل سهول فيضان. مساحات كبيرة. تتألف رسوباتها من الحصى والرمال والغضاريات. وقد تعرضت هذه الرسوبات إلى رياح غربية كنست الجزئيات الغبارية وحملتها باتجاه الشرق وأدت إلى أن تكون السماكة وحجم الجزئيات كبيرة بالقرب من الأنهار وصغيرة باتجاه الشرق. وشكلت مباشرة

غطاءات بسماكات مختلفة فوق الركام الجليدي قبل أن يتحوى.

أما رسوبات اللوس في شمال وغرب الصين فتتراوح سماكتها من (١٠٠-٣٠) متر وتغطي مساحات تقرب من (٨٠٠,٠٠٠) كيلو متر مربع. فقد دلت الدراسات على أن مصدر موادها من مناطق صحراوية (صحراء غربي) وهي التي تعطي اللون المميز للنهر الأصفر والبحر الأصفر.

إن ترب اللوس هي من الترب المستحاثية المهمة التي مكنت العلماء من التعرف على تاريخ رسوبات الرباعي. فحين تتعرض تراكيمات اللوس إلى مناخ رطب فإن الماء السطحي ينفذ فيها مودياً إلى فساد سطوحها الخارجية، وبالتالي إلى حل المواد الكلسية منها، ومن ثم ترسب هذه المواد مشكلة تخرّات كلسية تعرف بدمى اللوس loess doils، وحين تتغير الشروط نحو الجفاف، تتغير حركة المياه المتغلغلة فيه باتجاه الأعلى حيث تعطي قشرة كلسية سطحية. أما في المناخ البارد والجفاف، فإن تراكيم اللوس يكون متجانساً دون التأثير بأعمال التجوية. لذلك حين نجد في رسوبات اللوس نطاقات متجانسة غير متأثرة بالتجوية، متناوبة مع نطاقات بحواة، فإن ذلك يدل على تعاقب فترات برودة أو فترات جليدية مع فترات بين جليدية دافئة. وبهذا تم التعرف على المناخ المسيطر في الفترات الجليدية وبين الجليدية خلال البليستوسين. وقد دعمت المعلومات التي قدمتها ترب اللوس دراسات تمت على رسوبات من أعماق بحيرة تحتوي على أحياء ذات حساسية عالية للتغير المناخي.

# الفصل السابع

## الفعل الجيولوجي

### لمياه البحار والمحيطات

#### مقدمة عامة

المحيطات أحواض مائية ثابتة تشكلت منذ تصلب القشرة الأرضية، بينما تكون البحار أماكن منخفضة من اليابسة تغمرها المياه المالحة تارة فتظهر على شكل مسطحات مائية، وتنحسر عنها تارة أخرى فتتحول إلى أرض يابسة من جديد. أي أنها مناطق محدودة العمق تختلف تمام الاختلاف عن المحيطات. يكون العمق في بعض البحار بين (١٠٠-٢٠٠) م، بينما يصل عمق المحيطات إلى (٤٠٠٠-٦٠٠٠) م، وتنخفض حفرة الفيليبين في المحيط الهادي إلى عمق (١١٨٠٠) م.

تشغل المحيطات والبحار نحو ٧٠,٨٪ من سطح الكرة الأرضية، أي ٣٦١ مليون كيلو متر مربع من ٥١٠ مليون كم<sup>٢</sup> من المساحة الكلية. وبهذا تكون المساحة التي تشغلها المحيطات والبحار تقريبا أكبر من اليابسة بـ ٢,٥ مرة. ويجب أن يلاحظ أن توزع المياه واليابسة يختلف في نصف الكرة الشمالي عنه في النصف الجنوبي. ففي النصف الشمالي تشغل القارات ٣٩,٣٪ والمحيطات والبحار ٦٠,٧٪، بينما في النصف الجنوبي تنخفض فيه نسبة القارات إلى ١٩,١٪ وترتفع

نسبة المحيطات إلى ٨٠,٩٪، ولهذا السبب يدعى نصف الكرة الشمالي بالقاري والجنوبي بالمحيطي.

تقدر حجم كتلة المياه التي تتركز في البحار والمحيطات بـ ١,٣٢٠,٠٠٠,٠٠٠ كيلومتر مكعب. وتكون هذه الكتلة في حركة مستمرة وتحت تأثير فعل متبادل بينها وبين الأراضي المحيطة بها. إن مياه البحار والمحيطات موطن لحيوانات ونباتات مختلفة، ومستقر لرسوبات حطامية وكيميائية منقولة إليها من اليابسة بواسطة عوامل النقل المختلفة (أنهار - جليديات - رياح).

إن الفعل الجيولوجي لمياه البحار والمحيطات هو مجموعة مركبة من العمليات المتبادلة التي تضم تحطيم وتفتيت الصخور، ونقل المواد الصلبة والمنحلة إلى الأحواض المحيطية، ثم تراكم الرسوبات. والعمليّة الأخيرة لها أهمية كبيرة.

منذ مئات السنين من تاريخ الأرض، كان سطح اليابسة مغطى بمياه البحر، وخلالها تراكمت رسوبات بسمكات كبيرة أدت إلى تشكل طبقات من الصخور الرسوبية في الجزء العلوي من القشرة الأرضية. وإن مساحة اليابسة تحت الصخور الرسوبية تشكل نحو ٧٥٪ من السطح الكلي للقارات، وإن نحو ٥٠٪ منها صخور غضارية و ٣٠٪ رملية و ٢٠٪ صخور كربوناتيّة، بالإضافة إلى البقايا العضوية المحفوظة فيها. تقدم لنا دراسة هذه الصخور وثائق أولية تاريخية لمعرفة تاريخ القشرة الأرضية والشروط الجغرافية الطبيعية القديمة، وإعادة بناء العالم العضوي. وعلاوة على ذلك يوجد مع الصخور الرسوبية معظم الفلزات المفيدة مثل الغاز والبترول، وعامات الحديد والمغنيزيوم، والفوسفات وغيرها من المواد الاقتصادية الهامة.

سوف ندرس في هذا الفصل العمل الجيولوجي لمياه البحر: العمل الحثي من جهة، والعمل الترسبي من جهة أخرى. ويتأثر هذا العمل المزدوج بعدد من العوامل الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية والتكتونية التي سنبدأ قبل كل شيء بدراستها.



## ١- العوامل الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية

### ٢- درجة الحرارة

إن درجة حرارة المحيطات عامل من العوامل الفيزيائية والكيميائية التي تلعب دوراً مهماً في عمليات الترسيب. ويتحدد توزيع حرارة المياه السطحية للمحيطات بعدد من العوامل مثل:

١- درجة حرارة التسخين الناتج من الأشعة الشمسية.

٢- حركات الرياح.

٣- التيارات المحيطية التي تنقل المياه بدرجات حرارة مختلفة.

وقد لوحظ تناقص منتظم في درجات الحرارة ابتداء من المناطق الاستوائية باتجاه المناطق القطبية. وقد سجلت أعلى درجات الحرارة للمياه السطحية لمحيطات المناطق الاستوائية (محو ٢٧° و ٢٨°) مئوية وأخفض درجات الحرارة في المناطق القطبية (دون الصفر). وبهذا تنزلق كتل المياه الباردة تحت الكتل المائية الدافئة للبحار المعتدلة والاستوائية لكثافتها العالية نسبياً. وتخل هذه التيارات كميات كبيرة من الغازات، مما يسبب تهوية مستمرة للوسط البحري، وتسمح بالحياة في الأعماق السحيقة.

إن جميع التغيرات في درجات حرارة مياه المحيطات والتي تتعلق بالمتنطق المناخي، تحدث فقط في الطبقات العليا وحتى عمق (١٠٠-٢٠٠) م، بينما تتراوح درجة الحرارة في الطبقات القاعية في جميع المحيطات بين (٣-° و ٣°) مئوية، وتهبط دون الصفر في مناطق خطوط العرض العليا.

وقد تضطرب التغيرات المنتظمة في درجات الحرارة مع العمق، في بعض الأماكن، بتيارات مودية إلى إزاحة كتل مائية ضخمة في اتجاه أفقي. وتوجد هذه الشروط النوعية الحرارية في المحيط المتجمد الشمالي، حيث تكون درجة حرارة المياه السطحية تحت درجة الصفر حتى عمق (١٠٠) م، وأحياناً تصل إلى عمق (٢٠٠-٣٠٠) م، ثم ترتفع درجة الحرارة فتصبح فوق درجة الصفر حتى عمق

(١٥٠٠) م، وبعدها تنخفض ثانية إلى ما دون درجة الصفر. ويفسر وجود طبقة دافئة بين طبقات المياه الباردة بسبب تيار الخليج الدافئ، حيث تكون مياهه أكثر ملوحة وأثقل فتفوق تحت المياه السطحية العذبة لحوض المحيط المتجمد الشمالي.

#### ب - الضوء

يخترق الضوء المياه البحرية إلى أعماق تتراوح بين (١٠٠-٥٠) م وقد يصل إلى أعماق أكبر في المياه الصافية، مما يساعد على غو النباتات في المناطق قليلة العمق.

#### ج - الضغط

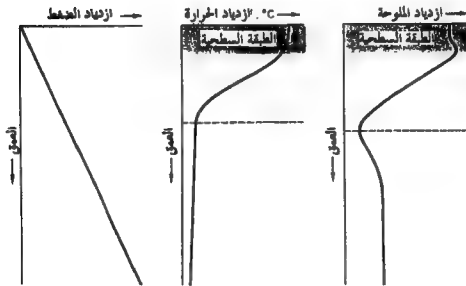
يزداد ضغط توازن المياه ضغطاً جويّاً واحداً كل عشرة أمتار. لذلك يكون الضغط مرتفعاً في الحفر المحيطية العميقة، مما يكسب الماء بعض الزوجة ويحل كمية كبيرة من الغازات، وهذه لها أهمية كبيرة في عمليات الترسيب العضوي.

#### د - نسبة الأملاح

تحتوي جميع المياه الطبيعية على أملاح معدنية بنسب مختلفة. وتبلغ النسبة الوسطية للأملاح في مياه البحار والمحيطات (٣,٥٪). وتعد هذه النسبة الثابتة إلى حد ما صفة مميزة لمياه المحيطات، ما عدا الطبقات السطحية منها حتى عمق (١٠٠-٢٠٠) م حيث تتعرض الملوحة إلى تغيرات محصورة بين (٣,٢٪ - ٣,٧٪) تبعاً للمناطق المختلفة. ففي المناطق الجافة، حيث الأمطار قليلة والتبخّر له أهميته، ترتفع نسبة الملوحة في الطبقات السطحية على عكس المناطق الرطبة تماماً، حيث تؤدي الأمطار الغزيرة إلى انخفاض نسبة الملوحة.

ويكون تأثير الشروط المناخية أكثر وضوحاً في البحار القارية. ففي بعض البحار ترتفع ملوحة المياه أو تنخفض بنسبة كبيرة عن مياه المحيطات، كما هو الحال في البحر الأحمر، الذي يقع في منطقة حارة وجافة ومخاط بأراض صحراوية، ترتفع نسبة الملوحة فيه إلى (٤,١٪ - ٤,٣٪). وبالمقابل توجد بحار أخرى تتراوح نسبة الملوحة فيها بين (١,١٪ - ٢,٠٪)، كما هو الحال في بحر آزوف والبحر الأسود

لكثرة الأنهار التي تصب فيها. تؤثر الملوحة في كثافة المياه، وهذا يؤدي إلى نوع من التطبيق المائي بحسب درجة الملوحة (شكل ١-٧).



شكل (١-٧): تغيرات الضغط والحرارة والملوحة مع الزيادة العمق في المحيطات.

التركيب الكيميائي: تحتوي مياه البحار والمحيطات على عدد كبير من المواد المنحلة، أهمها الكلوريدات ( $\text{NaCl}$ ،  $\text{MgCl}_2$ )، وتليها الكبريتات ( $\text{MgSO}_4$ ،  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ،  $\text{CaSO}_4$ )، والكربونات ( $\text{CaCO}_3$ ،  $\text{MgCO}_3$ ). أما بقية المواد فتكون بنسب قليلة. تكون عادة هذه المواد على شكل أيونات موجبة وسالبة مبنية في الجدول التالي:

الايونات	الكمية غ/كغ	النسبة المئوية
$\text{Na}^+$	١٠,٧٦	٣٠,٦١
$\text{Mg}^{2+}$	١,٣	٣,٦٨
$\text{Ca}^{2+}$	٠,٤٠	١,٦
$\text{K}^+$	٠,٣٨	١,٠٢
$\text{Sr}^{2+}$	٠,٠١	٠,٠٣٩
$\text{Cl}^-$	١٩,٣٥	٥٥,٠٤
$\text{SO}_4^{2-}$	٢,٧	٧,٦٨
$\text{HCO}_3^-$	٠,١٤	٠,٤١
$\text{Br}^-$	٠,٠٦٥	٠,١٨
$\text{F}^-$	٠,٠٠١	٠,٠٠٤

جدول ١٠٧: يبين التركيب للملحي لمياه البحار والمحيطات.

إن جميع النسب السابقة ثابتة تقريباً ما عدا أيون الكالسيوم ( $\text{Ca}^{++}$ ) فإنها متغيرة ويرجع ذلك إلى طبيعة الأراضي المحيطة بالبحار وبسبب الاستهلاك البيولوجي لها.

#### هـ - الغازات

تحتوي مياه البحر بالإضافة إلى الأملاح النيتروجين، والأكسجين وثنائي أكسيد الكربون ونادراً كبريت الهيدروجين. وإن الأكسجين وثنائي أكسيد الكربون لهما أهمية جيولوجية كبيرة لكونهما من الغازات الفعالة كيميائياً، حيث تلعب دوراً مهماً في عمليات الترسيب في الأحواض البحرية وفي عمليات الدياجينيز.

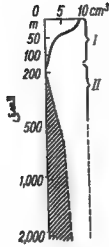
تأخذ مياه البحر الأكسجين من الهواء ومن خلال التركيب الضوئي للنباتات البحرية، ويستعمل في تنفس الحيوانات البحرية وأكسدة المواد المختلفة.

تختلف نسبة الاوكسجين في مياه البحار والمحيطات باختلاف درجة الحرارة والضغط والملوحة. وتبلغ نسبته في المياه ذات الملوحة النظامية والدرجة الصفر  $8,04 \text{ سم}^3/\text{الليتر}$ ، و  $6,41 \text{ سم}^3$  بدرجة حرارة  $10^\circ$ ، و  $5,53 \text{ سم}^3$  في الدرجة  $20^\circ$ ، وبهذا فإن حجم الأوكسجين المنحل في الماء يتغير بتغير الحرارة. ففي درجات الحرارة العالية (على أن يكون الضغط والملوحة ثابتين) تتشكل كميات كبيرة من الاوكسجين وينطلق الفائض منها إلى الغلاف الجوي.

وهكذا توجد علاقة ثابتة بين الغلاف الجوي والغلاف المائي، ففي الصيف تعطي المحيطات الاوكسجين للحو وفي الشتاء يحدث العكس. وتكون نسبة الاوكسجين مرتفعة في الأعماق القليلة لاحتوائها الضوء وكذلك في الأعماق الكبيرة لوجود التيارات البحرية الشاقولية (التيارات الحملانية).

يوجد غاز ثنائي أوكسيد الكربون بكميات كبيرة في مياه البحر. ومصدره من الغلاف الجوي، ومياه الأنهار، وفعالية الحيوانات البحرية وينطلق أيضاً أثناء النشاطات البركانية تحت الماء. ويكون في مياه البحر على شكل حر، وحز منه متحداً كيميائياً بشكل كربونات وبيكربونات ويكون هنالك توازن بين الشكلين. فعندما ترتفع نسبة ( $\text{CO}_2$ ) في مياه البحر، تتشكل الكربونات المنحلة كما هو الحال في المياه الباردة، وتصل كميات غاز ثنائي أوكسيد الكربون إلى حدها الأقصى في الأعماق الكبيرة.

أما بالنسبة إلى غاز كبريت الهيدروجين فيقتصر وجوده على نطاقات الأعماق والبحار المتصلة بمياه المحيطات عمر ممرات ضيقة مثل البحر الأسود. فقد عرفنا سابقاً أن مياه هذا البحر مطبقة بسبب الملوحة، فمياه الطبقات العلوية العذبة والباردة لا تستطيع أن تغوص لأعماق كبيرة، لذلك فإن كمية الأوكسجين تكون طبيعية على عمق (٤٠ - ٥٠) م، ثم تأخذ بالتناقص مع العمق حتى تصل نحو ١٥٪ من نسبتها على عمق (١٥٠) م كما هو واضح في الشكل (٧-٢).



I- نطاق الأوكسجين  
II- نطاق كبريت الهيدروجين

شكل (٢٠٧) يوضح نسبة الأوكسجين وكبريت الهيدروجين في البحر الأسود.

ويؤدي هذا الافتقار للأوكسجين إلى ارجاع الكبريتات بواسطة البكتريات اللاهوائية وتشكل كبريت الهيدروجين، وترتفع نسبته بازدياد العمق حيث تصل في الأعماق إلى (٦٠٥) سم<sup>٣</sup> في الليتر. وهذا النوع من الغاز يحدد نظام العالم العضوي وطبيعة تراكم الرسوبات في قاع البحار.

### ز - الحياة العضوية

إن البحر موطن لكثير من الحيوانات والنباتات التي تعتمد في تطورها وتوزعها على عدة عوامل منها: درجة الحرارة، الملوحة، حركة المياه، الضغط، نفوذ الضوء وبنية القاع. وبصورة عامة فإن نسبة وجود الكائنات الحية في المياه المالحة أعلى منها في المياه العذبة.

ويمكن أن تقسم العضويات البحرية، استناداً إلى موطنها وطريقة حياتها، إلى ثلاث مجموعات كبيرة:

١- العضويات القاعية أو اللاطفة Benthos

٢- العضويات الطافية أو المعلقة Planktons

## ٣ العضويات السابجة Nektons

١- العضويات القاعية: تعيش هذه الكائنات في قاع البحار مثل نجم البحر وحيوانات الطحلبية والاسفنجيات والاشنيات وبعض الرخويات والقنفذيات Echinoids، وبهذا نلاحظ غنى وتنوع الحياة في الأعماق لوفرة الأطعمة النباتية هنالك.

٢- العضويات الطافية: إن هذه الكائنات عديمة الحركة لذلك تعيش معلقة بالمياه، وتنقلها الأمواج والتيارات البحرية. وهي تشمل عضويات حيوانية ونباتية، ومن بينها وحدات الخلية الحيوانية التي لها أهمية كبيرة في تشكيل الرسوبات، مثل المنحربات foraminifera والشعاعيات Radiolaria ويضاف لها العضويات العائمة البربودا pteropods.

أما النباتات الطافية فنذكر منها الاشنيات algae كالمشطورات Diatomite والكركوليت Coccoliths (من مجموعة السوطيات). ولجميع هذه الكائنات هياكل صلبة أما كلسية أو سيليسية.

٣- العضويات السابجة: تستطيع هذه الكائنات الحركة في الوسط المائي وتشمل الأسماك والزواحف المائية والثدييات. ويكون لهذه الكائنات هياكل فوسفاتية قابلة للتحلل أو الأكسدة في الأعماق، ولهذا تكون رديئة الحفظ.

تأخذ الكائنات العضوية أهمية جيولوجية كبيرة في العمليات التي تتم في المحيطات. إذ يحصل تفاعل متبادل بين الماء والعضويات، حيث تستعمل العضويات المركبات الموجودة في ماء البحر في بناء هياكلها، بالإضافة إلى أنها تمتص بعض الغازات وتطرح بعضها الآخر، وهي تؤثر بدورها في التغيرات الكيميائية لماء البحر. وعند موت العضويات تتراكم في قاع البحار والمحيطات مختلطة بالرسوبات البحرية، وبالوقت نفسه يؤثر التفسخ العضوي في العمليات اللاحقة التي تحدث في الرسوبات الطينية وفي الوسط المائي.

## ٢- العوامل التكتونية: الحركات النسبية للقارات والبحار

### أ - الحركات التكتونية

تكون القارة التي تأخذ بالتهوض مركزاً لحركة موجبة. كما هي الحال على طول شواطئ بحر البلطيق. وتشكل أحزمة الأرصفت المرجانية والشواطئ البحرية الناهضة إلى ارتفاعات مختلفة، الدليل على الحركات الموجبة القديمة (جزر المحيط الهادي). وتعرض القارات أيضاً لحركات سالبة، وقد تبين الملاحظة وجودها، فعندما يهاجم البحر أراضي القارة يغمرها بمياهه، ويكون هكذا بحالة تجاوز.

### ب - الحركات التوازنية

سبق أن شرحنا من قبل طبيعة هذه الحركات. ولقد تم ربطها بتشكيل الجليديات، وقد لعبت دوراً مهماً في تطور الشبكة المائية.

تؤدي الحركات التكتونية والتوازنية إلى انتقال نسبي لخطوط الشواطئ. ويعبر عن تقدم البحر وتراجعته بالتجاوز *transgression* والانسحاب *regression*. وإن إعادة بناء هذه التجاوزات والانسحابات هو موضوع الجيولوجيا التاريخية.

وبصرف النظر عن هذا الانتقال الذي هو من مرتبة عشرات أو حتى مئات الكيلومترات فإن خطوط الشواطئ هي موضوع يتحدد محلي عائد للعمل الحثي للبحر يكون هذا العمل الحثي ظاهراً بصورة خاصة على طول الشواطئ الصخرية.

## حركة المياه في المحيطات والبحار

إن حركات المياه في المحيطات والبحار متنوعة كثيراً، ولكن اصطلاح أن تصنف تحت العناوين التالية أ - الأمواج، ب - المد والجزر، ج - التيارات البحرية والمحيطية.

### أ - الأمواج

هي من أهم العوامل تأثيراً في المناطق الشاطئية، فالرياح هي العامل الأول في تكوين الأمواج. وهناك بعض الأمواج التي تسببها الهزات الأرضية والانفجاعات



البركانية التي تحدث في قاع المحيطات أو البحار. وقد تتشكل أمواج ذات حجم كبير نتيجة للانزلاقات تحت البحرية. والذي يهمنا في هذا المجال هو الأمواج الناجمة من حركة الرياح.

فإذا هبت الرياح على سطح مائي اختكت بسطحه وساعدت على تكوين موجات صغيرة لا تلبث أن تزداد ارتفاعاً واتساعاً تبعاً لقوة الرياح وضغطها على جوانب الموجات، فتتحول بذلك الموجات الصغيرة إلى موجات كبيرة.

يقاس ارتفاع الموجه بالمسافة العمودية بين ذروتها وبطن الموجه التي تليها. فإذا كانت الرياح قوية بلغ ارتفاع الموجه (١٥) متراً، أما الأمواج العادية فيتراوح متوسط ارتفاعها من ٦ - ٩ أمتار.

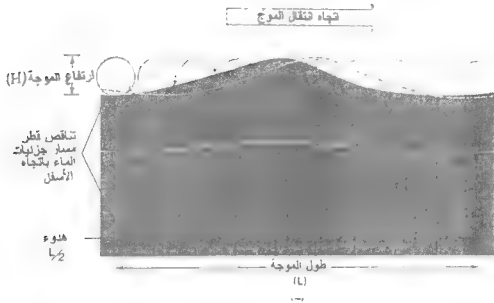
يقاس طول الموجه بالمسافة الأفقية بين ذروتها وذروة الموجه التي تليها، وقد يصل طولها إلى ٢١٠ أمتار وأحياناً إلى ٧٥٠ متراً إذا كانت الرياح قوية جداً.

كذلك يتوقف حجم الموجات، بالإضافة إلى سرعة الرياح، على عمق مياه البحر أو المحيط الذي تتولد فيه. فكلما ازداد عمق هذه المياه قلت اعاققة قاع البحر لحركة الأمواج وسرعتها.

لا تتأثر مياه البحار العميقة بفعل الرياح إلا لعمق بسيط جداً لا يتعدى المستوى الذي يهب إلى قاع للموجات. فإذا بلغت الموجات منطقة ساحلية ضحلة يقل عمقها عن ارتفاع الموجه تكسرت وأصبحت لمياهها قوة هائلة يكون لها مقدرة كبيرة على الحث والنقل.

حركة الأمواج **wave motion**: تتولد الأمواج في البحار والمحيطات من هبوب الرياح فوق سطوحها. ويسين لنا الشكل (٧-٣) كيف تتضاءل الأمواج تجاه الأعماق حين لا يوجد تأثير منها على القاع. أما حركة الموجه فتختلف تماماً عن حركة جزيئات الماء الموجودة في نطاقها. ويمكن تشبيه ذلك بحركة الرياح فوق حقل من الأعشاب أو القمح، حيث تنثني ثم تعود إلى وضعها السابق وتعطي شكلاً موجياً. وبطريقة مماثلة تمر الموجه في الماء وتحرك جزيئاته للأعلى والأسفل

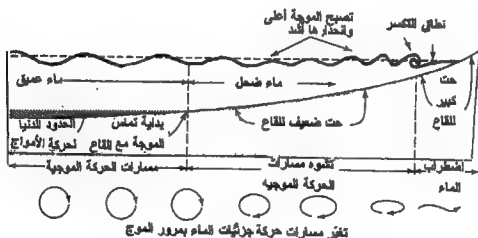
وتعيدها إلى وضعها السابق بدروة كاملة. وقد حددت هذه الحركة باثباتات نظرية وإثباتات عملية تجريبية، عن طريق وضع أوعية زجاجية ملونة تطفو على سطح الماء وتصوير حركتها أثناء مرور الموج فيها بكاميرات سينمائية.



شكل ٣.٧: حركة جزيئات الماء بمرور للموج.

تستمد الأمواج طاقتها الحركية من الرياح الملازمة لسطح الماء، فهي آتية من السطح فقط، ويكون قطر مسار الجزيئات المائية المتحركة الموجودة على السطح معادلاً لارتفاع الموجة (شكل ٣.٧)، وتتضاءل الطاقة الموجية تدريجياً باتجاه الأسفل، أو بتعبير آخر تتناقص أقطار الحركة الدورانية باتجاه الأسفل حتى تتلاشى. وعندما يكون عمق الماء معادلاً لنصف طول الموجة ( $\frac{L}{2}$ ) تتلاشى الحركة الدورانية. ومع أن أطوال الأمواج في المحيطات تكون في معظم الأحوال أقل من (٦٠٠) متر، إلا أنها حين تصل إلى هذه القيمة يصل تأثيرها إلى الأجزاء العميقة من الرضوف القارية، مما يؤدي إلى تحريك المواد الرسوبية الناعمة المستقرة على القاع للأعلى والأسفل وبالتالي تحركها على المنحدرات القارية باتجاه الأسفل.

أما ما يحدث في المياه البحرية الضحلة القريبة من الشواطئ فيكون أكثر سرعة ويجري في طريقة مختلفة، فعندما تصل الموجة إلى نطاقات أعماقها أقل من  $(\frac{L}{2})$  فتصبح قاعدة الموجة على تماس مع القاع، ويتغير شكل الموجة وتصبح الحركة الدورانية لجزيئات الماء اهليلجية وذات سرعة أكبر، كما يؤدي تأثير القاع في الأمواج إلى تقصير طولها وازدياد ارتفاعها وإلى عدم تناظريتها، حيث يصبح لها مقدمة شديدة الانحدار. وبما أن مقدمة الموجة تكون في مياه عمق قاعها أقل من مياه جزئها الخلفي، فإنها تصبح ذات انحدار شديد يزداد تدريجياً حتى تنهار ويتبعها الجزء الخلفي، وهكذا تنكسر الأمواج قرب الشاطئ وتصبح حركتها اضطرابية (شكل ٧-٤). ويدعى نطاق النشاط الموجي الواقع بين بداية تكسر الأمواج وخط الشاطئ نطاق التكرس surf zone. وفي حال الأمواج الشديدة تضرب كل موجة صخور الشاطئ وتصبعد مياهها للأعلى على السطوح الصخرية المائلة، حيث تتلاشى طاقتها الحركية وتعود المياه ثانية إلى البحر بطريقة غير نظامية ومعقدة، أما عودتها فتكون أحياناً على شكل تيارات مائية عريضة موازية للقاع، أو تجري ضمن أفتية عملية ضيقة، وإن مياه الأمواج العائدة للبحر يشعر بها السباحون وتعرف بتيارات تحت السطح undertow.



شكل ٧-٤: للتغيرات التي تحدث للموجة عند تحركها إلى الشاطئ.

## ب - تيارات المد Tidal currents

تشكل تيارات المد نتيجة الجذب المشترك للشمس والقمر للأرض، وتتجلى بتجاوز ماء البحر على اليابسة مرتين كل ٢٤ ساعة و ٥٠ دقيقة.

كان نيوتن أول العلماء الذين اهتموا بدراسة المد والجزر، وهو صاحب نظرية الجاذبية التي تقول: إن أي جسمين يتحاذيان وتتوقف قوة الجذب على كتلة هذين الجسمين. فهي تتناسب طردياً مع الكتلة ( $m$ ) وعكسياً مع مربع المسافة بينهما ( $d$ ):

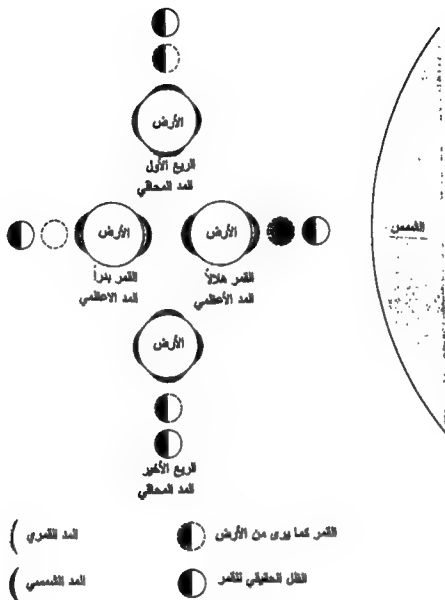
$$F = \frac{m1 \times m2}{d^2}$$

وتطبق هذا القانون على القوة الناتجة من جذب الشمس والقمر للأرض يمكن نيوتن من شرح السبب في رفع مياه البحر وخفضها نتيجة للحركة المعروفة بالمد والجزر.

ولما كان القمر أقرب إلى الأرض بكثير، فإن قوة جذبهُ للأرض تفوق قوة جذب الشمس، رغم صغر حجمه بالنسبة للشمس. ويتجسم من ذلك أن المياه في القسم المواجه للقمر ترتفع إلى أعلى، حيث تعاكس قوة جذبة قوة الثقل الأرضية. في حين أن القسم الآخر للأرض البعيد عن القمر تنخفض مياهه إلى أسفل لعدم تأثيره بقوة جذب القمر وازدياد تأثيره بالثقل.

ولما كانت الأرض تدور حول محورها وحول الشمس فإنها تخضع لهذه القوة مرتين كل ٢٤ ساعة و ٥٠ دقيقة.

وقد يتفق تأثير الشمس والقمر في عملية المد وقد يختلفان، وذلك حسب موقع الشمس والقمر من الأرض. فعندما يكون اتجاه القمر والشمس على مركز الأرض بزاوية صفر أو ١٨٠ درجة، فإن القمر والشمس يؤثران في حركة المد ويكون أعظمياً. وتحدث هذه الحالة مرتين في الشهر، عندما يكون القمر هلالاً أو بدرًا. أما عندما تكون الزاوية على سطح الأرض بين الشمس والقمر ٩٠°، فإن المد يكون أقل مما يمكن لأن قوة جذب القمر تنقص بمقدار الثلث (قوة جذب الشمس) ويطلق على المد في الحالة الأولى اسم المد الأعظمي Spring tide وعلى المد في الحالة الثانية اسم المد الخافئ Neap tide (شكل ٥-٧).



شكل ٥.٧: تمثيل تخطيطي يوضح أطوار القمر وحصول المد الأعظمي والمد المملي.

تختلف طبيعة المد والجزر من مكان لآخر ففي المحيط الأطلسي لوحظ أنه خلال اليوم يحدث مدان وجزران، أما في المحيط الهادي فيحدث مد واحد. وقد اكتشف أخيراً أن حركة المد والجزر ظاهرة اقليمية وليست عالمية. ويرجع هذا إلى دوران

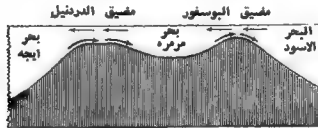
الأرض حول نفسها وهي القوة التي تؤدي إلى أن تظل بعض المياه ثابتة في أماكنها. أما عن الفعل الجيولوجي لتيارات المد والجزر فليس له أثر يذكر في تشكيل السواحل. وقد يكون لها في بعض الأحيان سرعة تكفي لنقل المفتتات الصخرية وترسيبها في المناطق الشاطئية.

وقد لوحظ في المناطق التي تتأثر بموجات المد تفوق عملية الترسيب على عملية الحث، إذ إن قوة تيار المد لا تكون لها قدرة كبيرة على الحث. وقد تقوم عملية الجزر بعمل حتى إلى حد ما، وذلك لكون الجزر يسبب تزايداً كبيراً في سرعة مياه الأنهار التي توقفت تقريباً أثناء المد ويسحب عندئذ الوحل الذي توضع جزء منه بتماس المياه البحرية والمياه العذبة، وتتكشف مزاريب المصببات على أبعاد طويلة في المنطقة الساحلية.

### حـ - التيارات البحرية

تسبب الرياح التيارات البحرية وتختلف عن الأمواج بكونها كتلة متصلة من المياه تتحرك حركة مستمرة. وهكذا فإن رياح الإليزيه (في خليج ستريم) في شبه جزيرة فلوريدا تسبب انتقالاً للمياه السطحية بسرعة ١,٧٠ م/ثا على عمق ٧٠٠ م وتنتشر على عرض ٨٠ كم.

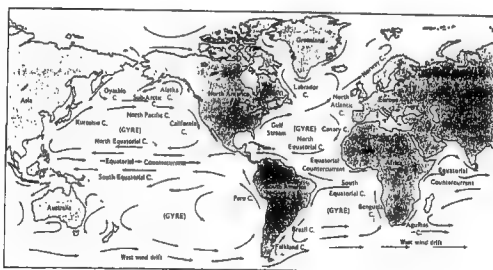
كذلك تتشكل تيارات متباينة الكثافة ناجمة من اختلاف درجة الحرارة، حيث تتناقص الكثافة بازدياد درجة الحرارة. ففي المناطق القطبية تهبط المياه السطحية الباردة إلى القاع وتنتشر باتجاه خط الاستواء.



شكل ٦.٧ تيارات الملوحة بين البحر الأبيض المتوسط والبحر الأسود. يتجه تيار عميق ذو كثافة عالية (الأسهم الثخينة) من البحر المتوسط إلى البحر الأسود، وبالمقابل يتجه تيار سطحي خفيف (الأسهم الرقيقة) من البحر الأسود إلى البحر المتوسط.

بما أن كثافة المياه تختلف باختلاف درجة الملوحة وتزداد بازديادها، لذلك يتكون في مياه البحر نوع من التطبيق للمياه بحسب درجة الملوحة التي تتزايد مع العمق. ولهذا تقوم بين الأحواض المغلقة ذات الملوحة المرتفعة، نتيجة للتبخر، والبحار تيارات متبادلة. وعلى هذا الأساس يجتاز مضيق الدردنيل تيار سطحي ذو مياه خفيفة يتجه من البحر الأسود إلى بحر إيجه، ويمر بالمقابل تيار عميق ذو مياه ثقيلة في الاتجاه المعاكس (شكل ٧-٦).

إن التيارات الشاطئية هي أكثر التيارات البحرية أنثراً في تشكيل الشواطئ، ولكن بشكل عام يمكن أن نقول إن التيارات البحرية يقتصر عملها على نقل المواد الناعمة وتوضعها في أماكن أخرى قد تبعد بضعة كيلومترات. فتيار الخليج الدافئ الذي يصل عمقه إلى بضعة مئات من الأمتار وعرضه إلى ٢٧٥ كيلومتراً على طول الشاطئ السكندينياني، ينقل الرسوبات القارية الناعمة من المناطق الضحلة ومن الجزء الأعلى للمنحدر القاري إلى مسافة تنوف على آلاف الكيلومترات (شكل ٧-٧).



شكل ٧.٧: التيارات السطحية لمحيطات العالم.

وقد تؤدي بعض التيارات العميقة إلى حفر أخاديد تحت مائية وإلى اقتلاع الرسوبات ونقلها إلى أماكن أبعد. لهذا فإن التيارات البحرية تسهم في نقل الرمال والغضاريات القارية ونشرها على قاع المحيطات.

### الفعل الجيولوجي لمياه البحار والمحيطات

يكون الفعل الجيولوجي لمياه البحار والمحيطات واضحاً في المناطق الشاطئية حيث تتلاقى عندها المياه بكل القارات. ويظهر عندها نشاط الأمواج والتيارات البحرية وحركات المد والجزر كموامل للمحت والرسيب، كما يظهر فيها نشاط الأنهار في الرسيب فقط.

#### العمل الحثي للأمواج

تستهلك الطاقة الحركية للأمواج بمعظمها في نطاق التكرس بالاضطراب والاحتكاك بالقاع وتحريك الرسوبات ونقل المواد الناعمة منها إلى عرض البحر. لذلك نجد أن معظم الفعل الجيولوجي للأمواج يتم في هذا النطاق. ويعتمد العمق الذي تبدأ فيه الأمواج بالتكرس وتحريك الرسوبات وحت الصخور الشاطئية على ارتفاع الموج وطبيعة القاع. وتبدأ معظم الأمواج البحرية بالتكرس على عمق يقرب من ارتفاعها أو من ١,٥ ضعف ارتفاعها. فإذا كان ارتفاع الموج لا يزيد في معظم الأحوال على ستة أمتار، فإن العمق الحثي الفعال للأمواج لا يزيد على تسعة أمتار تحت سطح البحر. وقد أثبتت هذه الخلود النظرية بالملاحظات التي توصلت إلى أنه من النادر أن يؤثر تكرس الأمواج في قيعان تزيد أعماقها على سبعة أمتار. فإذاً يكون نطاق تكرس الأمواج هو المكان التي تعمل فيه الأمواج البحرية ذات الطاقة الحركية الاضطرابية العالية على حت اليابسة.

والجدير بالذكر أن صرب الأمواج لليابسة يكون عنيفاً وفعالاً أثناء العواصف الشديدة. فالشاطيء الغربي لسكوتلندا معرض بشكل مباشر لأمواج المحيط



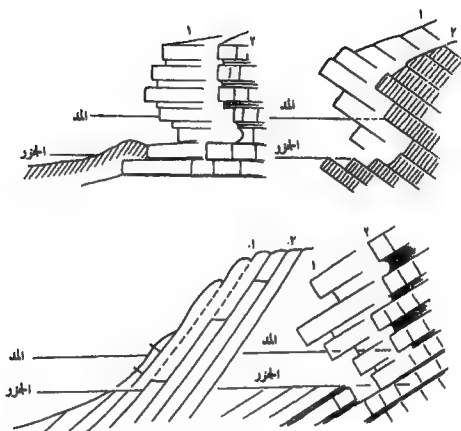
الأطلسي. وأثناء عاصفة كبرى أدى ضرب الأمواج إلى فصل كتلة كبيرة، من رصيف كاسر للموج، تزن نحو (١٢٠٠) طن وتحريكها نحو عرض البحر. وفي عاصفة أخرى حدثت بعد خمس سنوات ضربت الأمواج هذه الكتلة وحطمتها. ويقدر الضغط المؤدي لمثل هذا العمل الحثي بنحو ٢٧ طن / م<sup>٢</sup>. ويمكن للأمواج البحرية أن تحطم الكتل الصخرية وتبعداها عن مصدرها بقوتها الضاغطة على الصخور، فعندما تصطدم مياه الأمواج بالصخور الشاطئية تؤدي إلى ضغط الهواء الذي يملأ الشقوق والفواصل الصخرية. وعندما يرتد الموج إلى عرض البحر يعود الهواء المضغوط إلى التمدد بصورة فجائية بقوة كبيرة تكاد تبلغ درجة الانفجار فتؤدي إلى تكسير الصخر وتفتيته.

أما المسافة الشاقولية التي يصل إليها فعل الأمواج فوق مستوى سطح البحر، فيمكن أن تُهل من ليس له حجرة جيدة عن الشواطئ. فخلال عاصفة شتاء حدثت عام ١٩٥٢ على شاطئ اسكوتلندا أيضاً شعلرت الأمواج قارباً بخارياً صغيراً وألقت نصفه على حرف صخري يرتفع (٤٥) متراً عن سطح البحر.

ويوجد نوع آخر من الحث يحدث ضمن نطاق تكسر الأمواج، وهو البري والسحب بواسطة المواد الرسوبية المحمولة في مياه الأمواج، التي تضرب في صخور الشاطئ، مما يؤدي إلى إزالتها وتوسيع شقوقها وتنعيم السطوح الصخرية وتدويرها ولكن يختلف تأثير الأمواج في الصخور الشاطئية بحسب العوامل التالية:

١- طبيعة الصخور: فالصخور اللينة تنهدم بصورة أسرع من الصخور القاسية.

٢- ميل الطبقات الصخرية التي تتكون منها المنطقة الشاطئية، فإذا كان هذا الميل نحو البحر ساعد ذلك على تفكك الصخور بعد تآكل بسيط. أما الميل نحو اليابسة فإن صخورها تقاوم التعرية البحرية بدرجة أعظم (شكل ٨-٧).



الشكل ٨.٧: تطور الشواطئ بحسب وضعية الطبقات.

١- مرحلة سابقة ٢- مرحلة لاحقة

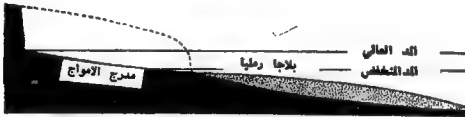
٣- الفواصل والشقوق التي تنتشر في الصخر، فكلما كانت كثيرة كان التهدم سهلاً. أما إذا كانت قليلة فإن مقاومة الصخر للتحلل البحري تكون كبيرة.

٤- اتجاه الأمواج: فإذا كان عمودياً على الشواطئ كان أثرها في تفكيك الصخور أعظم مما لو كان مائلاً. لأن المياه في الحالة الأخيرة لا تصطدم مباشرة بالشاطئ وإنما تسير موازية له دون أن تحدث أثراً ما.

ومما لا شك فيه أن أثر الأمواج في تشكيل النطاقات الشاطئية ذات الصخور المفتتة يختلف عنه في حالة الشواطئ الصخرية. ففي الحالة الأولى يقتصر عمل الأمواج على سحب المواد المفتتة نحو البحر. أما في الحالة الثانية فإن العمل الحقي

للأمواج يظهر بصورة واضحة. ولذا تتميز هذه الشواطئ بتعدد الظواهر الجيومورفولوجية أهمها الفجوات والكهوف والأقواس البحرية.

١- الفجوات: Notches: تحفر الأمواج البحرية أسفل الصخور الشاطئية في المنطقة التي تقع بين مستوى المد والجزر، وتؤدي إلى تشكل فجوة تظهر فوقها صخور الشاطئ نائمة نحو البحر، ثم لا تلبث أن تنهار بفعل الثقالة الأرضية، ويظهر الشاطئ على شكل حرف قائم مرتفع يعلو بوضوح فوق مستوى سطح البحر، ويتغير تبعاً لذلك انحدار الشاطئ. ويستمر عمل الأمواج في الصخور الشاطئية وتكون في أسفلها فجوة جديدة، وهكذا تراجع الشواطئ وتغمر مياه البحر الأجزاء التي كسبتها من المنطقة الشاطئية مشكلة ما يسمى مدرجات الأمواج wave - cut terrace. أما للمواد المفتتة فتتراكم في قاعدة الجدار مشكلة شيئاً فشيئاً بلاجا رمليا beach يحد مستواه المائل من قوة الأمواج وتتوقف في النهاية عملية الخت.

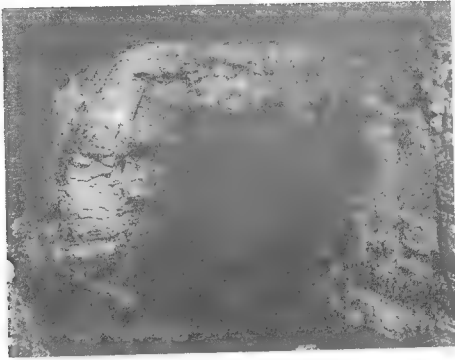


شكل ٩.٧: يوضح تراجع خط الشاطئ وتشكل مدرج الأمواج.

٢- الكهوف Caves: تتكون الكهوف في الشواطئ الصخرية التي تتميز بكثرة الفواصل والشقوق الشاقولية، حيث يكون لقوة الأمواج وما تحمله من مواد مفتتة عمل حتى كبير على طول الشقوق. ثم لا تلبث الفجوات المتشكلة تدريجياً أن تتوسع، نتيجة انثقاع الأمواج نحو الشاطئ وضغط الهواء الموجود بداخلها ثم تمدهه بصورة فجائية عندما تتفقر مياه الأمواج، مما يؤدي إلى زيادة حجم الفجوات التي

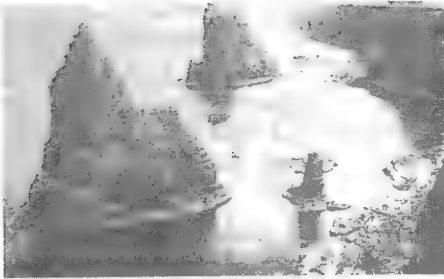
تبدو على شكل كهوف.

٣- الأقواس البحرية Sea arches: وهي تتكون في الشواطئ التي تكون فيها اليابسة ممتدة على شكل لسان صخري في عرض البحر، حيث تحفر فيها الأمواج كهوفاً بحرية جانبية نتيجة اصطدام مياه البحر من كلا الجانبين. ثم لا يلبث الكهفان الجانبيان أن يتقابلا وتكون فتحة كبيرة في اللسان الصخري، وتعرف أمثال هذه الفتحة بالأقواس البحرية.



شكل ١٠٧: الأقواس البحرية.

عندما تنهار الأجزاء العليا من هذه الأقواس فإنها تبدو على شكل أعمدة قائمة (المسلات البحرية Stacks or Sea Needles)، إلى جانب الشاطئ الصخري وتكون قاعدتها أعرض من أطرافها العليا.



شكل ١١-٧: يوضح المسلات البحرية .

وقد تتكون المسلات البحرية أيضا في الحالة التي تصمد فيها بعض التكوينات الصخرية الصلبة أكثر من التكوينات اللينة.

٤- الشواطئ المتعرجة: تتعرج الشواطئ عندما تتعاقب فيها تكوينات صلبة مع تكوينات لينة، حيث يكون تأثير عمل الأمواج في التكوينات اللينة أكبر منها في التكوينات الصلبة، مما يؤدي إلى تشكيل شواطئ متعرجة كثيرة الرؤوس والخلجان.

## ب - نقل الرسوبات بواسطة الأمواج

يتحرك الفتات الصخري الناجم من اهتزاز اليابسة بالأمواج مع ما تجلبه الأنهار والمجاري المائية الأخرى إلى البحر تحركاً متقطعاً. فهي تُسحب أو تُدحرج على القاع أو تُحمل في فترات غير نظامية أو تُنقل بحالة معلقة غروية، وذلك حسب حجمها وحسب طاقة الأمواج والتيارات البحرية. ويمكن للرسوبات في نطاق التكسر الموجي، حسب ما يلاحظ في معظم الشواطئ، أن تتحرك باتجاه اليابسة أو بعيداً عنها باتجاه البحر. وفي الجزء الداخلي من هذا النطاق، حيث تكون المياه عميقة نسبياً، تنزاح الرسوبات على القاع بالأمواج أثناء العواصف بحركات مختلفة، تكون حصيلتها التحرك نحو عرض البحر. فكل حبة رسوبية تُقتلع من مكانها عدة مرات في كل حالة تزداد فيها طاقة الموج. ومع ازدياد العمق تتناقص الطاقة الحركية بشكل تدريجي للدرجة تصبح فيها غير عركية إلا للمواد الناعمة. ويحصل نتيجة ذلك فرز للرسوبات حسب التدرج الحجمي من الخشن بالقرب من الشاطئ إلى الناعم بالابتعاد عن الشاطئ.

يُجد في الرفوف القارية التي بنيت بالرسوبات أن رسوباتها تتدرج بشكل نظامي من الرمل إلى الغضار. وهذا يشمل جميع المواد الرسوبية الناجمة من حت الأمواج والمنقولة من اليابسة إلى البحر. وقد أحرزت حسابات على نسب المشاركة بين هذه الرسوبات على امتداد بعض الشواطئ أشارت إلى أن حجم الرسوبات المنقولة من اليابسة إلى البحر أعظم بكثير من الرسوبات الناجمة من حت الأمواج. وتختلف هذه النسب من مكان لآخر حسب عوامل عديدة ومتنوعة.

يلاحظ في الشواطئ الموجودة في مناطق خطوط العرض العالية والمتوسطة أنه لا يوجد دائماً التدرج الحجمي بالابتعاد عن اليابسة، وعوضاً عن ذلك يلاحظ وجود حواجز طولانية من الخصى الخشن موجودة وراء نطاق تكسر الأمواج، وفي عدد من الحالات يشهد وجود مثل هذه الحواجز إلى مصدر جليدي من مورينات سابقة توضع فوق رفوف قارية ناهضة، وكانت شواطئها أخفض مما هي عليه الآن. وقد أدى هبوط المورينات وارتفاع مستوى البحر إلى تخريب أعرافها الحادة

بالأمواج والتيارات وتركيز الحصى الخشن بعيداً عن الشاطئ.

### حـ - توضعات الشواطئ

عندما تلتقي الأمواج بالشاطئ، لا تكون قوة اندفاعها واحدة في جميع النقاط. فهناك مناطق محمية تكون سرعة الأمواج فيها ضعيفة وبالتالي يكون عملها ترسيبياً بحتاً. أما المناطق التي يكون فيها اصطدام الأمواج قوياً فتكون موادها المفتتة كثيرة وعند تهقرها تأخذ معها كثيراً من هذه المواد ثم تدفعها ثانية نحو الشاطئ. وهكذا تتكرر هذه العملية وينجم منها نحو التتوعات والزوايا في القطع الصخرية وصقل جوانبها حتى تصبح ملساء ذات أشكال مدورة أو بيضوية.

وعندما تشتد الرياح وتصبح زوايا وأعاصير، فإن قوة الأمواج تشتد وتقلد المواد المفتتة إلى الشاطئ وتوضعها في منطقة تعلو عن مستوى البحر، ويكون توضعها على أشكال طولية تنحدر نحو البحر. وتكون المواد المترابطة في هذه الحالة خشنة ولا أثر للمواد الناعمة فيها، لأن الأمواج تأخذها معها إلى عرض البحر. تدعى الشواطئ التي تتراكم فيها أمثال هذه الرسوبات بالشواطئ الحصوية. وتتكون عادة في الشواطئ الصخرية حيث تساعد على وجود كميات كبيرة من الحصى.

إذا دخلت الأمواج البحرية القوية منطقة محمية كالخلجان فإنها تفقد قوتها بالتدرج وتوضع حولتها على شكل حبل شاطئي يفصل بين المنطقة الخليجية والبحر مشكلاً بحيرة شاطئية Lagoon هذا إذا كانت الأمواج عمودية. أما إذا كانت الأمواج مائلة فإنها تؤدي إلى تشكل الشواطئ الرملية (البلاجات) نتيجة انتقال المواد المفتتة على طول الشاطئ وترتيبها حسب حجمها.

### الترسيب البحري

#### أ - النطاقات البحرية المختلفة

لقد استعمل في تحليل الرسوبات البحرية ووصفها قرائن مختلفة. إلا أن الأعماق التي تشكلت فيها هي أكثر القرائن استعمالاً وعلى هذا فقد ميز بدءاً من الشاطئ

نحو عرض البحر النطاقات التالية:

١- المنطقة الساحلية.

٢- نطاق الأعماق.

٣- نطاق الأعماق السحيقة.

### ١- المنطقة الساحلية أو منطقة الرف القاري Continental shelf

يتراوح عمق هذه المنطقة من الصفر إلى - ٢٠٠ م. ويكون الانحدار ضعيفاً من رتبة اثنان بالألف. وإن وجود توضعات قارية وأخاديد نهريّة وبحار سيلية عديدة على طول المنحدر البحري يدل على أنها ناجمة من تهديم القارة. وتشمل هذه المنطقة على:

أ - النطاق الشاطئي Littoral zone: ويشمل الأجزاء الشاطئية الواقعة بين الحدين الأقصىين للمد والجزر وتكون رسوباتها وسطاً بين البحرية واللابحرية.

ب - النطاق الضحل Neritic zone: ويشمل الأجزاء البحرية الواقعة بين الحد الأدنى للجزر وحافة المنحدر البحري حيث يزداد انحدار قاع البحر بشدة وبشكل فجائي. وغالباً ما يشكل هذا الانكسار المفاجئ في العمق حداً طبيعياً حقيقياً لهذا النطاق.

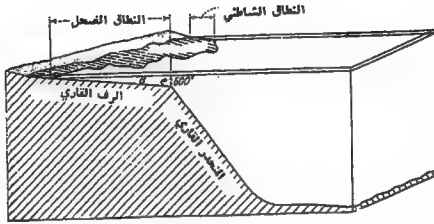
### ٢- المنحدر القاري أو bathyal zone الأعماق أو Continental slope

وهو نطاق ذو انحدار شديد من رتبة ٤٠ - ٦٠ بالالف ويمتد من عمق - ٢٠٠ م إلى عمق - ٢٠٠٠ م.

### ٣- نطاق الأعماق السحيقة Abyssal zone

وهو نطاق يتجاوز عمقه - ٢٠٠٠ م، وتوجد فيه حفر قد يصل عمقها إلى - ٥٠٠٠ م أو - ٧٠٠٠ م أو حتى - ١١٨٠٠ م.





شكل ١٢.٧: يوضح للمناطق البحرية المختلفة.

## ب - عمليات الترسيب في النطاقات البحرية المختلفة

١- رسوبات المنطقة الساحلية: إن العمليات الترسيبية التي تجري في المناطق البحرية الضحلة عمليات فيزيائية وكيميائية وعضوية يأخذ كل منها أهمية واتساعاً حسب المناطق المختلفة.

تؤثر الأمواج وتيارات المد والجزر والتيارات البحرية في استقرار الرسوبات في الأجزاء القليلة العمق وتؤدي إلى اهتراء الحبيبات وتكسر مواقع الكائنات الحية أو الميتة.

حين تدخل مياه الأنهار النطاق الضحل تترك قسماً كبيراً من حمولتها بسبب الانخفاض المفاجئ لسرعتها، وقد تشكل أحياناً السدادة الموحلة بسبب الفعل الكتروليتي لمياه البحر المؤدي إلى تشكل ندف، ناجمة من تحلل المعقدات الغروية. وقد يكون توضع هذه المواد مؤقتاً أو دائماً حسبما تكون المنطقة فوق مستوى تأثير الأمواج أو تحته.

كذلك تنشط في المناطق الساحلية العمليات الكيميائية حين تتوافر المواد المنحلة المختلفة المنقولة إلى البحر، والتي يجري ترسيبها إما بفقدان غاز الكربون أو بسبب

التركيب الضوئي للنباتات البحرية المؤدية إلى ترسيب الكربونات، أو بسبب تشكل كبريت الهيدروجين بفعل البكتيريا المرجعة المؤدي إلى ترسيب الكبريت، أو بسبب الترسيب المباشر الناجم من نشاط عمليات الترسيب.

عادة تكون الأماكن الضحلة غنية بالكائنات الحية وذلك عندما يكون القاع متماسكاً يسمح بنمو الحيوانات اللاطفة مثل الرخويات وشوكيات الجلد والبراكايودا والمرجانيات. وأحياناً أخرى تملأ المناطق الضحلة من الكائنات الحية بسبب جرف الرسوبات من القاع بالتيارات المائية، أو بسبب تفورات مفاجئة في درجات الملوحة والحرارة التي تؤدي إلى موت الكائنات الحية وسقوطها إلى القاع.

### توزيع الرسوبات في المنطقة الساحلية

تميل الأماكن القريبة من الشاطئ إلى احتواء الرسوبات الخشنة، وغالباً ما تكون هذه الرسوبات سمكية في المناطق القريبة من مصبات الأنهار. أما البقايا العضوية فيتم حفظها حين يتجه لها طمر سريع بالمواد الرسوبية.

وبصورة عامة تتوزع الرسوبات الخطامية المنقولة إلى البحر بشكل تزداد فيه خشونة الحبيبات مع الاقتراب من خط الشاطئ. فإذا تصورنا مقطعاً عرضياً يمر في رسوبات المنطقة الساحلية وجدنا أننا نبتدئ برسوبات بحصية قريبة من الشاطئ لا تلبث أن تنتقل باتجاه الداخل إلى رملية ثم إلى سلتية غضارية وأخيراً رسوبات غضارية. وقد نجد في بعض الأماكن طبقات كلسية أو تناوب طبقات غضارية كلسية وغضارية رملية مع طبقات كلسية، وذلك حسب ملائمة شروط بقاءه للحياة العضوية.

٢- رسوبات نطاق الأعماق: تشمل رسوبات الأعماق الغضاريات والأوحال العضوية، ورسوبات تيارات العكر.

تغطي قاع نطاق الأعماق مواد غضارية آتية من اليابسة، ويميل لونها إلى الرمادي والرمادي المزرق. وتوجد في الأماكن المجاورة للنطاق الضحل أوحال كلسية ناعمة.

اما الأوحال العضوية التي يحويها نطاق الأعماق فهي ناجمة من عضويات أكثرها مجهرى، تلاصقت مع الحياة في نطاق المياه السطحية، وأكثر هذه الكائنات الحية تبنى قواقعها من مادة كربونات الكالسيوم أو السيليكا المنحلة في مياه المحيطات. وعند موت هذه العضويات تسقط قواقعها إلى الأعماق وتستقر على القاع مكونة ما يسمى أوحالاً عضوية<sup>(١)</sup>. وإن وحل الغلوبيجيرينا Globigerina ooze وحل الشعاعيات Radiolarian ooze من أشهر الأوحال العضوية المعروفة وأكثرها انتشاراً.

يظهر في نطاق الأعماق والأعماق السحيقة ما يسمى رسوبات العكر Turbidites. تنشأ تيارات العكر Turbidity currents عند مصبات الأنهار، حيث تتراكم على سطوح منحدره قريبة من الشاطئ كميات كبيرة من الرسوبات، وبازدياد التراكم على سطح منحدر، أو بنتيجة لحركة هزة أرضية يمكن أن تنزلق مشكلة تيارات عكر ذات سرعة كبيرة، يمكنها أن تنقل الرمال والحصى إلى نطاق الأعماق، أو توصلها إلى الأعماق السحيقة.

٣- رسوبات نطاق الأعماق السحيقة: تغطي الرسوبات الغضارية مساحات شاسعة من قاع المحيطات. وتكون ناعمة للغاية، ويوجد فيها عقد منغنيزية.

أما مصدر الغضاريات فقير معروف تماماً، ويحتمل أن تكون ناجمة من الغبار الذي تذروه الرياح فوق سطح المياه، أو يمكن أن تصدر من الرماد البركاني، أو ذات منشأ قاري نقل بواسطة الأنهار من اليابسة إلى المحيطات. يميل لون الغضاريات إلى الرمادي المزرق أو الأحمر. ويرجع اللون الأحمر إلى تهيج أوساط مؤكسدة، لأن المياه القطبية تحمل معها حين تهبط باتجاه قاع البحر شيئاً من الأوكسجين وثنائي أوكسيد الكربون، وبما أن هبوط الجزئيات الرسوبية يتم بشكل بطيء، فإن هذه الجزئيات لها فرصة كافية لأكسدها قبل أن تستقر على القاع.

أما العقد المنغنيزية فتتألف من نواة دقيقة صلبة مكونة من ذرة رمل أو شظية صخرية أو مستحاثية، محاطة بطبقات من أوكسيد المنغنيز بسماكات مختلفة. أما

(١) توصف عادة الرسوبات بأنها أوحالاً عضوية حين تحوي ما يقرب من ٣٠٪ قواقع عضوية.

مصدر أو أكسيد المنغنيز فمن الممكن أن يكون ذا منشأ قاري من اليابسة، أو مشتقاً من تفاعل المواد البركانية تحت البحرية مع المياه البحرية وهو الأكثر احتمالاً. أما الأرواح العضوية التي يحويها نطاق الأعماق السحيقة، فهي أرواح الشعاعيات، وتخلو من الأرواح العضوية الكلسية، لأن القواقع المجهرية المتساقطة تنوب في المياه القطبية المحملة بثنائي أكسيد الكربون قبل وصولها إلى القاع.

### معدل الرسيب

تتراكم الغضاريات والأرواح العضوية في الأعماق والأعماق السحيقة بنفس المعدل تقريباً، ولكن يتغير حسب الموقع والبيئة، حيث تتراوح معدلات الرسيب في المحيط الهادي والمحيط الهندي ما بين المليمتر والسنتيمتر في كل ألف سنة، بينما تتراوح في المحيط الأطلسي من (١-١٠) سنتيمتر. ويرتفع هذا المعدل بنسبة كبيرة في الرفوف القارية وأعلى المنحدرات القارية، إذ يقدر بـ (٢٠ - ٣٠) سنتيمتر كل ألف سنة.

### الهبوط التدريجي لقاع الحوض الرسوبي

يلوذي استمرار تراكم الرسوبات فوق قاع الحوض الرسوبي إلى تزايد سماكتها وبالتالي إلى هبوط القاع تدريجياً تحت تأثير ثقل الرسوبات الهائل. ومن الأدلة الواضحة على هبوط قاع الحوض الرسوبي، وجود الأرضفة المرجانية ورسوبات ذات سحنة نيريتية على أعماق كبيرة. مع أن الأرضفة توضع في الأصل على قيعان لا يزيد عمقها على ٢٠٠م. والأرضفة المرجانية تنمو على قيعان لا يتعدى عمقها بضعة عشرات من الأمتار. وهذا دليل واضح على هبوط قاع الحوض الرسوبي بشكل تدريجي بصورة متناسبة مع تزايد سماكة الرسوبات المتوضعة في هذا الحوض.

### السحنات Facies

تعرف السحنة من الناحية الجيولوجية بأنها المظهر العام للبيولوجي والبيولوجي لرسوبات ما. وبالإمكان أن نميز بالنسبة للمنشأ: سحنة حطامية، وسحنة كيميائية،

وبيو كيميائية. أما بالنسبة للعمق فنميز سحنة شاطئية ونيريتية وعميقة ومحيقة. وتمتاز السحنة الشاطئية بالأرصفة الهامشية والتوضعات الخشنة والجبال الشاطئية والتشكيلات البيوضية.

أما السحنة النيريتية فتمتاز باحتوائها على الشنات كلسية ومرجانيات وطحليبات، وتشكل العناصر الخشنة جزءاً هاماً منها.

أما سحنة الأعماق فتتميز بأن موادها تكون غضارية أو غضارية كلسية، وقد تكون على شكل أوحال عضوية. بينما تكون رسوبات سحنة الأعماق السحيقة غضارية سيليسية حمراء اللون.

### صفات الرسوبات البحرية

تتصف الرسوبات البحرية بعدد من الصفات يمكن اختصارها بما يلي:

#### ١- التطبيق

تتوضع الرسوبات على شكل طبقات منضدة بعضها فوق بعض. وينجم هذا التطبيق من تغيرات في الرسيب، وهذه التغيرات لها أسباب عديدة. ينجم التطبيق من توقف الرسيب وعودته من جديد إذا حدث تغير قبل استئناف الرسيب. فلو صببنا رملاً في كأس ماء وتوقفنا ثم تابعنا صب الرمل فإن التطبيق لا يظهر ما لم نهز الكأس كي ينضغط الرمل قليلاً قبل أن نستأنف صبه من جديد. فأي تغيير ولو كان بسيطاً في شروط الرسيب أو في المواد الرسوبية يؤدي إلى ظهور التطبيق. فقد ينجم من تغير في طبيعة الرسوبات، أو في أحجام الحبيبات المرسبة. ويكون التطبيق واضحاً في التوضعات الموسمية وذلك بتعاقب نطاقات قائمة اللون ونطاقات فاتحة اللون حسب التغيرات المناخية.

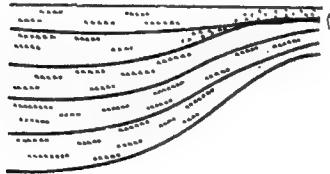
البنية العدمية والممرات الجانبية: يتفاوت انتظام سماكة الطبقات وامتدادها في حدود واسعة، ففي أنواع صخور الغضار الصفحي يكون التطبيق منتظماً ومستوياً.

أما في غيرها فإن الطبقات ترقى أو تزداد سماكتها أو تنقطع على شكل عدسات. وقد تحدث البنية العدسية غالباً في المناطق الشاطئية التي تتميز بوجود بحيرات شبه مغلقة. حيث يلاحظ وجود طبقات ذات امتداد أفقي محدود ينتهي طرفها في شكل إسفيني ويمر بوضوح إلى طبقات ذات طبيعة مختلفة.

التوافق وعدم التوافق: تستمر عمليات الترسيب منذ أن بدأ الحث على سطح الأرض، ومن المحتمل أن يجد في بعض مناطق قاع المحيط سجلاً ترسيبياً متصلاً يمثل جميع الأزمنة الجيولوجية حتى الوقت الحاضر. وفي هذه الحالة تكون الطبقات متوازية بصورة منتظمة وتشكل ما يسمى المجموعات المتوافقة.

أما فوق اليابسة، عندما تدرس سلاسل الصخور الرسوبية، فإنه يظهر فيها ثغرات صغيرة أو كبيرة تمثل توقف عمليات الترسيب لفترة من الزمن، سواء تبع ذلك ترسيب مواز للطبقات السابقة أم ترسيب على سطح حتى للطبقات السابقة، أو مسطح حتى لطبقات سابقة أصيبت بالطي، ففي هذه الحالة الأخيرة يحصل عدم توافق زاوي.

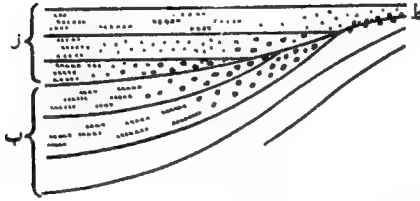
تظهر الحالات الأولى من عدم التوافق في العتبات حيث أن الترسيب في حفرة الترسيب أكبر مما هو في العتبة. وقد لا تتوضع في العتبة بعض الطبقات تبعاً لظروف معينة فيوجد مكانها سطح مهمل (شكل ١٣-٧).



شكل ١٣-٧: حفرة ترسيب وعتبة.

تكتسب الرسوبيات في حفرة الترسيب (إلى اليسار) في سماكات أكبر منها في العتبة (إلى اليمين) وقد لا تتوضع في هذه العتبة بعض الطبقات، فيوجد مكانها سطح مهمل (ب).

كذلك يحصل عدم التوافق في حالة التحاوزات والانسحابات البحرية (شكل ١٤-٧).



شكل ١٤-٧: رسم تخطيطي يبين لمرّة ملمسجة (ب)، ولمرّة متجاوزة (ز)، يفصل بينهما عدم توافق سترايغرافي. ويمثل (ط) سطح طفو.

## ٢- المستحاثات Fossils

تتصف الرسوبات البحرية باحتوائها على مستحاثات، تكون محفوظة جيداً في الرسوبات العميقة، على عكس مما في الرسوبات الشاطئية. ويعتمد على المستحاثات في تعيين العمر النسبي للصخور وبالتالي التعاقب الزمني لها، وذلك بالمقارنة مع تسلسل طبقي حدد تعاقبه الزمني اعتماداً على المستحاثات. وهناك فوائد لوجود المستحاثات، بغض النظر عن تحديد عمر الصخور، إذ يمكن الاستدلال منها على وضعية الطبقات المتعاقبة، مثل وضعية النمو للمرجانيات، والحشو الجزئي للقواقع وجحور الديدان.

## ٣- الأرصفة المرجانية Coral reefs

يتطور على امتداد الشواطئ في المنطقة المدارية مستعمرات مرجانية، تتكون من كتلة من العضويات الكلسية مثبتة بصخور قاع البحر. تنمو المرجانيات على عمق

يتراوح بين - ٢٠ م إلى - ٤٥ م في مياه مضطربة تحتوي على الأوكسجين ودرجة حرارة لا تقل عن ٢٠° مئوية وملوحة نظامية ٣٥ غ/الليتر، ولهذا توجد في بحار المناطق المدارية، ولا تنمو في مصبات الأنهار حيث تقل نسبة الملوحة وتتراكم الرسوبات.

يسهم عدد من العضويات في بناء المستعمرات المرجانية كالاشنيات الكلسية والطحلبيات والرخويات ووحيديات الخلية المجهرية (الفورامينيفيرا)، حيث تملأ هيكلها الكلسية ثقبوف وفحوات الرصيف المرجاني وتحوله إلى كتلة صلبة متماسكة. وهكذا فإن المرجانيات تشكل الهيكل الرئيسي الذي يملأ بالعضويات والرسوبات الكلسية.

يمكن أن نميز استناداً إلى أشكال المستعمرات المرجانية ومكانها الأنواع التالية:

أ - الأرصفة الهامشية **Fringing reefs**: تتشكل على طول الشواطئ وتكون موازية لها.

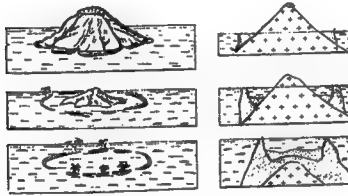


شكل ١٥٧: رصيف مرجاني هامشي.



ب - الأرصفة الحاجزة **Barrier reefs**: تتشكل على مسافة ما من الشاطئ وتصلها عنه منطقة لاغونية موازية للشاطئ. وأشهر الحواجز المرجانية واضخمها موجود على الشاطئ الشمالي الشرقي لاسفوايا، حيث تمتد لمسافة تزيد عن ٢٠٠٠ كم وتبعد عنه ٥٠ - ١٠٠ كم.

ج - الجزر المرجانية **Atolls**: وهي عبارة عن حواجز مرجانية تتكون وتنمو حول الجزر في المياه المدارية (وخصوصاً في المحيط الهادي)، وقد تعرض بعض هذه الجزر للغمر بمياه المحيط فظلت حواجز المرجان حولها على شكل حلقة تملؤها مياه المحيط من الداعل وتعرف مثل هذه الجزر بالحلقات المرجانية.



شكل ١٦.٧: تشكل الجزر المرجانية

ان الأنواع الأخرى من المستعمرات المرجانية تبلغ سمكات كبيرة قد تصل إلى عمق ٣٩٠٠ م. كيف نستطيع أن نشرح هذه السمكات الكبيرة مع أن الحيوانات المكونة للمستعمرات لا تعيش إلا عمق في حدود (٤٥-٤٠ م).

لقد تعرضت نظريات عديدة لتفسير سماكة الأرصفة المرجانية منها نظرية داروين Charles Darwin، حيث تقول إن السبب الرئيس هو هبوط الركيزة الصخرية التي تتركز عليها المرجانيات هبوطاً تدريجياً. ويرجع بعض العلماء

السماكات الكبيرة للأرصفة المرجانية إلى التغيرات التوازنية لمستوى سطح البحر خلال الحقب الرباعي. فقد انخفض هذا المستوى خلال مرحلة جليدية واحدة من (٩٠ - ١٠٠) م، أو حتى (١٥٠) م بالنسبة لبعض الجيولوجيين. فالتضاريس الطافية تتسطح بالحت وتصبح الجزر ممهدة. وقد سمح المناخ الحار خلال الفترة بين الجليدية أو بعد الجليدية بتمركز المرجانيات، التي تأخذ بالنمو نحو الأعلى أثناء ارتفاع مستوى سطح البحر إثر ذوبان الجليديات.

# الفصل الثامن

## البحيرات والمستنقعات وأهميتها الجيولوجية

### مقدمة

تتكون البحيرات من تجمع المياه في منخفضات قارية مغلقة، لا تتصل مباشرة بالبحار. وإن دراسة تشكل البحيرات وشروطها الفيزيائية - الكيميائية، والكائنات الحية التي تعيش فيها، تكون فرعاً خاصاً من الهيدرولوجيا يعرف بعلم البحيرات Limnology.

تغطي البحيرات مساحة نحو ٢,٧٠٠,٠٠٠ كم<sup>٢</sup> أي نحو ١,٨٪ من سطح القشرة الأرضية، ٧٥٪ منها بحيرات عذبة. وتختلف في أحجامها واتساعها: من بحيرات صغيرة مساحتها أقل من كيلومتر مربع (بحيرة جنيف في سويسرا ٠,٦ كم<sup>٢</sup>) إلى بحيرات كبيرة تغطي آلاف الكيلومترات المربعة. وكذلك تختلف في أعماقها، من عشرات السنتيمترات (كما في بحيرة ايلتون ٨,٨ م) إلى ١٦٢٠ م في بحيرة بايكال في سيبيريا. وتتراوح في ارتفاعها عن سطح البحر من مستويات أعلى منه إلى مستويات أدنى منه كما في البحيرات السكندنافية والبحر الميت.

إن دراسة التوزيع الجغرافي للبحيرات واطلاعها العميقة وطبيعة احواضها، ودرجة ملوحتها تمكننا من فهم العمليات التي تجري داخل القشرة الأرضية وعلى سطحها. وهكذا فإن تحول البحيرة التي يخترقها نهر من الأنهار إلى بحيرة راكدة

مغلقة، أو البحيرات ذات المياه العذبة إلى بحيرات مالحة، يشير إلى تغير في المناخ من رطب إلى جاف، في حين ان ظهور بحيرات كبيرة وعميقة يكون دليلاً على حدوث حركات تكتونية قوية في القشرة الأرضية، وحدثت انهدامات فالقية أدت إلى تشكل هذا النمط من البحيرات. وكذلك تساعد دراسة الرسوبات البحرية الحديثة على فهم أصل الرسوبات المماثلة العائدة لأحقاب قديمة.

## أصل أحواض البحيرات

إن أصل الأحواض البحرية شديد الاختلاف والتنوع، وقد وصف كل من العالمين السوفيتيين آ. بيرفوخين Pervukhin وبوغوسلوفسكي Bogoslovsky أحواض البحيرات امتداداً إلى ظواهر منشقية genetic features إلى الأنواع التالية:

### ١- البحيرات التكتونية

تشكل هذه البحيرات نتيجة للحركات التكتونية التي تصيب القشرة الأرضية، والتي تؤدي في كثير من الأحيان إلى انخفاضات بسبب انهدامات فالقية، حيث تنخفض الأرض المحصورة بين فالقين متوازيين مشكلة حوضاً يمتلئ بالماء بنتيجة حركة المياه السطحية، وتكون نوعاً من البحيرات الانحدودية.

وأهم ما يمتاز به تلك البحيرة انها عظيمة الطول وقليلة العرض، وإن عمقها كبير وجوانبها شاقولية ومرتفعة، ومن أمثلة هذا النمط بحيرتا طبريا والبحر الميت، المحصورتان بين فالقين كبيرين على امتداد عطف الانهدام الكبير من جبال طوروس في الشمال حتى البحر الأحمر في الجنوب، وبحيرة تانجانيكا في أفريقيا وبحيرة بايكال في سيبيريا.

وقد ينتج من الحركات التكتونية تشوهات تأخذ شكل مقعرات كبحر الخزر، أو تقبب تكتوني يرتفع من قلب الأودية فتشكل حواجز تقف عندها المياه، كبحض بحيرات السهل السويسري الذي أدى تطور التقببات فيه إلى حجز المياه المنحدرة إليه من جبال الألب.

## ٢- البحيرات البركانية

تشكل أحواض هذا النمط من البحيرات من تجمع المياه، في فوهات أو كلديرات بركانية قديمة (بحيرة Servieres في جبال الكتلة المركزية) أو في فوهات بركانية كبعض بحيرات في (جزر كامشتكا واسلندا)، وقد تؤدي البراكين إلى تشكيل حواجز في كثير من الأودية، عندما تكوّن مخاريطها في هذه الأودية، أو عندما تلقي صلاتها فيها (مثل بعض بحيرات هضاب أرمينيا).

## ٣- البحيرات الجليدية

يكون هذا النوع ٩٠٪ من بحيرات العالم. فهي عظيمة الانتشار على الرغم من أن المناطق التي تتأثر بالجليديات في الوقت الحاضر، والتي تأثرت به في الماضي المناطق محدودة. وتشكل أحواض هذه البحيرات بنتيجة النشاط الحثي أو الرسوبي للجليديات، وهي منتشرة بخاصة في الأقاليم القارية التي كانت مغطاة بالجليديات، والذي يعود تاريخها إلى بدء ظهور الإنسان (Anthropogen). وأهم هذه البحيرات:

أ - بحيرات الحلبيات الجليدية: كثيراً ما تحتل قيعان الحلبيات الجليدية بعض البحيرات الصغيرة بنتيجة تجمع المياه الناجمة من ذوبان الجليد.

ب - البحيرات المعلقة: تتكون البحيرات المعلقة من تجمع المياه في الأودية الجليدية المعلقة.

ج - بحيرات السدود الجليدية: قد تعرض المورينات الجبلية الوادي الذي تنحدر فيه الجليدية، كسد يحول دون تسرب المياه الناجمة من الذوبان، فتتجمع المياه أمام المورينات مكونة بعض البحيرات.

وهناك نوع من البحيرات تتكون في مناطق المورينات الجبلية للجليديات. ففي الحالة التي تتشكل فيها جليديات السفوح، تبنى المورينات الجبلية على شكل هلال عظيم المساحة، فالمياه الناجمة من الذوبان تتجمع خلف المورينات الجبلية مشكلة

#### بحيرة جليدية في المناطق السهلية.

وكذلك تتشكل بحيرات عندما تتقدم الغطاءات الجليدية وتعرض بعض البحاري المائية مشكلة سدا تتجمع المياه إلى جانب الحائط الجليدي، وتكون ما يعرف ببحيرات السدود، وهي كثيرة في جزيرة غرينلاند.

د - هناك نوع من البحيرات تكونها الغطاءات الجليدية وهو من أهم الأنواع جراً تتشكل هذه البحيرات نتيجة الحفر المستمر الذي تسببه الألسنة الجليدية المنحدرة من الغطاءات الجليدية وتكون أحواض واسعة لا تلبث أن تمتلئ بالماء بعد ذوبان الجليديات وتكون بحيرات واسعة عظيمة المساحة. وأمثلة هذا النوع كثيرة ومنها البحيرات الخمس الكبرى في أمريكا الشمالية التي تعد أعظم بحيرات العالم اتساعاً.

#### ٤- البحيرات النهرية:

هي بحيرات تتشكل نتيجة الفعل الجيولوجي للأنهار، وهي بحيرات متعددة الأنواع مختلفة المظاهر أهمها ما يلي:

أ - تنتشر بعض البحيرات في السهول اللحفية التي تكثر فيها الالتواءات في البحاري النهرية. وتتشكل بخاصة أيام الفيضانات النهرية حيث تؤدي سرعة المياه الكبيرة إلى قطع الالتواءات مشكلة البحيرات الهلالية، كبحيرات وادي الميسيسيبي.

ب - في حالة الفيضانات النهرية الكبيرة المفاجئة، يمكن أن تتجمع الرسوبات الضخمة التي حفرتها مياه الفيضان في الأماكن الضيقة من النهر، مشكلة حاجزاً تقف خلفه المياه.

ج - قد تتشكل الأحواض البحرية من أحد فروع الدلتا التي قطعت اتصالها بالبحر.

#### ٥ - البحيرات الشاطئية

تتشكل هذه البحيرات خلف ألسنة الرسوبات المتوضعة على طول الشاطئ أو خلف الكبان الرملية الشاطئية.

## ٦- بحيرات الأراضي الكلسية:

نلاحظ ما يكون قاع الدولين في الأراضي الكلسية مملوءاً بالماء، وقد يكون هذا التجمع موسميّاً أو دائماً.

وذكر أيضاً وجود بحيرات جوفية في أغلب الكهوف والمغاور الكارستية كبحيرة جعيتا في مغارة جعيتا بلبنان.

أما أحواض البحيرات الحرارية الكارستية Thermokarst lacustrine فتكون موحدة فقط في المناطق دائمة التجمد. حيث يؤدي ذوبان الجليد في بعض مناطقها إلى تشكل أحواض مملوفا المياه الناجمة من ذوبان الجليد. وهي تشبه في أشكالها البحيرات المتشكلة على سطح الصخور الكلسية.

## ٧- بحيرات الزلاقي الأراضي:

قد تتجمع الكتل المنزلقة على طول منحدرات المناطق الجبلية في الأودية المجاورة وتشكل سدا يعترض سير المياه وتتجمع على شكل بحيرة، كبحيرة البهرنة في جبال الجورا.

تعرف البحيرات التي تتشكل نتيجة انغلاق الوديان بالزلاقي الأراضي في المناطق الجبلية، أو في حالة الفيضانات النهرية الكبيرة، أو بتدفق اللانفا، أو في حالة السد الجليدي ببحيرات السدود Dammed lakes. وإلى هذا النمط تنسب خزانات المياه التي يتم إيجادها عن طريق إنشاء السدود الاصطناعية، كما هو الحال في بحيرة الأسد.

تلك كانت فكرة موحدة عن أصل الأحواض البحرية، وهنا يجب أن نلاحظ أن قوى مختلفة تعمل في الطبيعة متوافقة وتؤدي إلى تغيرات مختلفة على سطح الأرض، بما في ذلك تشكل أحواض البحيرات. فهناك بعض البحيرات التي ترجع في أصلها إلى اجتماع عدد من العمليات الداخلية والخارجية. وعلى سبيل المثال نذكر بحيرتي لادوغا وأونيجا فقد تشكلتا بنتيجة عوامل تكوينية (يشير إليها تصدعات في الركيزة الصخرية) غير أن للجليديات القارية القديمة، التي غطت هذه

البقعة مرة بعد أخرى دوراً مهماً في تشكيلهما.

### أصل مياه البحيرات:

يرجع أصل مياه البحيرات إلى المصادر الرئيسة التالية:

١- المياه الجارية السطحية (مياه الأنهار والأمطار) التي تملأ المنخفضات التضاريسية.

٢- المياه الباطنية، حين يتقاطع منسوب الماء الجوي مع منخفض قاري مغلق يحتل بالماء.

٣- مياه المحيطات، ويكون هذا واضحاً في البحيرات التي ليس لها أنهار مصرفة، ومقطعة من البحر كما هو الحال في بحر قزوين<sup>(١)</sup>، فقد كان في القديم متصلاً ببحر آزوف عبر قناة مانيش Manych.

### النظام الهيدرولوجي للبحيرات:

يرتبط النظام الهيدرولوجي للبحيرات ارتباطاً وثيقاً بالشروط المناخية، ويمكن أن نصنف البحيرات استناداً إلى شروطها الهيدرولوجية إلى:

أ - بحيرات عديمة التصريف: وتكون هذه البحيرات منتشرة في المناطق الجافة ونصف الجافة، وتتغذى بمياه الأنهار والسيول السطحية والأمطار وليس لها نهر مصرف، وإنما تخسر مياهها بوساطة التبخر فقط.

ب - بحيرات المياه الجارية: وتوجد هذه البحيرات غالباً في أماكن ذات مناخ رطب، تصل إليها المياه بوساطة الأنهار والسواقي الرافدة، وتخرج منها بوساطة الأنهار والسواقي المصرفة.

ج - بحيرات ذات تصريف متناوب: يستمر فيها التصريف فقط في وقت ارتفاع منسوب الماء. وبعض البحيرات يتم تصريف مياهها فقط عن طريق تسربها عبر صخور الركيزة الصخرية.

---

(١) مثال البحيرة المخلقة ولكبرها يطلق عليها بحر.



أما سوية الماء في البحيرات فتتغير بصورة مستمرة. وتكون هذه التغيرات طفيفة وموسمية في المناطق المعتدلة.

ولطبيعة الأراضي تأثير كبير في تغير سوية ماء البحيرات. فالبحيرات الواقعة في مناطق ذات صخور نفوذة، يكون تغير سوية الماء فيها كبيراً، بينما يكون العكس في البحيرات الواقعة في مناطق ذات صخور كثيفة.

### التركيب الملحي لمياه البحيرات Salt composition of lake water

يعتمد التركيب الكيميائي لمياه البحيرات على توازن المياه والمظاهر المناخية. فالبحيرات التي تقع في مناخ رطب، وذات مياه متجددة باستمرار، تتميز بمياه سطحية ونمت سطحية عذبة، أما البحيرات التي تقع في مناطق جافة وحارة، فإنها تزداد ملوحة لشدة تبخر مياهها.

تعتمد درجة الملوحة وتركيب الأملاح في مياه البحيرات أيضاً على نوع الأملاح المحمولة إليها بمياه الأنهار الرافدة، والبنية الجيولوجية، وطبيعة غطاء الأنقاض الصخرية وعلى الغطاء النباتي وعلى عوامل أخرى كثيرة. ويمكن أن نصنف البحيرات ذات المياه المالحة حسب تركيب المواد المنحلة في مياهها إلى النماذج التالية:

١- البحيرات القلوية أو الكربوناتية Soda or carbonate lakes

٢- البحيرات المرة أو بحيرات الكبريتات Bitter or sulphate lakes

٣- البحيرات المالحة أو الكلوريدية Saline or chloride lakes

تكون المياه في بعض البحيرات ذات تطبيق مائي، فالمياه المشبعة بالأملاح تكون مستقرة في الأعماق. أما المياه السطحية، فتكون نسبة الأملاح فيها ضعيفة جداً وقد يستفاد منها في الشرب.

### النظام الحراري للبحيرات:

تكون المياه في البحيرات ذات تطبيق حراري، حيث تكون كثافة الماء أكبر ما يمكن في الدرجة +٤°. تكون درجة حرارة قاع البحيرة +٤°، أما المياه السطحية

فتختلف درجة حرارتها باختلاف الفصول، فترتفع في الصيف وتنخفض في الشتاء، ولكن هذا الاختلاف لا يتعدى عمقاً قليلاً من مياه البحيرة.

وحين تصبح حرارة المياه السطحية  $+4^{\circ}$  فإن التطبيق الحروري ينعدم، وتختلط المياه السطحية بالعميقة ويصبح الوسط المائي مضرراً بالحياة. ويلاحظ اختفاء الأسماك في هذه الفترة.

أما مياه البحيرات في المناطق البركانية وفي البحيرات العميقة، فتكون درجة حرارتها ونسبة أملاحها مرتفعة بالأعماق، بالإضافة إلى ارتفاع نسبة  $CO_2$  و  $SH_2$  ولهذا تكون الحياة مستحيلة في هذا النمط من البحيرات.

### حركة مياه البحيرات:

تظهر حركة كسل الماء في البحيرات على شكل أمواج أو تيارات أو مزج اضطرابي للمياه، وأيضاً تظهر من خلال انخفاض منسوب الماء وارتفاعه. وجميع هذه الحركات تحصل بتأثير الرياح. وأبعد من ذلك فإن مزج الماء بواسطة تيارات الحمل، بسبب تباين الكثافة، يجعل الحركة تأخذ مجراها في البحيرات.

يمكن أن يلاحظ في بعض البحيرات الكبيرة، وفي جو هادئ، حركات سطح الماء الناجمة من تغيرات الضغط الجوي، فمستوى المياه يرتفع ببطء كبير في أحد جوانب الشاطئ بضعة سنتيمترات، مع انخفاض موافق في الجانب الآخر من الشاطئ. وتدعى مثل هذه الحركات بحركات سيشز *Seiches*.

ولكن تبقى الحركات الناجمة عن تأثير الرياح أهمها وتقوم بدور فعال في عمليات الحث والنقل.

## الفعل الجيولوجي للبحيرات

### أ - الحث البحيري

يمثل الحث الناتج عن عمل الأمواج في البحيرات كثيراً الحث البحري ويختلف عنه بالشدة فحسب. حيث تقوم الأمواج بيري الأسماك النائمة من جهة، وإيجاد

فجوات وحفرا في الصخور الشاطئية من جهة ثانية، مودية إلى انهيار الطبقات العلوية وتراجع خط الشاطئ بمعدل بضعة أمتار في السنة. ويكون العمل الحثي للأمواج كبيراً عندما تكون الرياح على شكل أعاصير قوية. وطبقاً لبعض المعطيات التي سجلت أثناء العواصف التي اجتاحت الاتحاد السوفيتي عام ١٩٥١، تبين تراجع خط الشاطئ في بعض أماكن إحدى البحيرات بمقدار ٥ - ٨ م في أسبوع واحد. وإن العامل الرئيس الذي يساعد الأمواج على الحث هو المواد المفتتة وطبيعة الصخور الشاطئية فيما إذا كانت غر متماسكة أو لينة.

## ب - الترسيب البحري

إن الأهمية الأولى لنشاط البحيرات هو تراكم رسوبات فيها تكون مصدراً لعدد كبير من الفلزات الاقتصادية. وتتحدد طبيعة الرسوبات البحرية بعوامل مختلفة منها: الشروط المناخية، والمظاهر التضاريسية والتصريف والبنية الجيولوجية للمنطقة المحيطة وحجم وشكل حوض البحيرة، ونسبة التدفق للبحيرة. فالرسوبات في المناطق الجافة تختلف عن مثلتها في البحيرات الموجودة في مناطق رطبة. وكذلك تختلف الرسوبات في بحيرات ذات مياه جارية عذبة عن الرسوبات التي توجد في بحيرات ذات مياه راكدة. ويمكن أن نعيّن حسب الفواهر المنشئية وتركيب الرسوبات ثلاثة نماذج من الرسوبات البحرية:

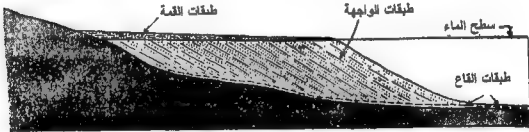
- ١- رسوبات أرضية المنشأ Terrigenous أو حطامية Detrital وهي تأتي بالدرجة الأولى من المواد اللحقية التي تنقلها الأنهار الرافدة للبحيرات، ونسبة أقل من المواد الناتجة عن الحث البحري.
- ٢- رسوبات كيميائية المنشأ Chemogenous وهي تنشأ من ترسيب كيميائي للأملاح أو الفرويات المنحلة في الماء.
- ٣- رسوبات عضوية المنشأ Organogenous: وتنجم من تكلس البقايا الصلبة للكائنات الحية التي تعيش في طبقات المياه السطحية، وفوق قاع البحيرات.

## الترسيب الحطامي

آ - الرسوبات الشاطئية: تكون الرسوبات في الشواطئ ذات فرز جيد بسبب غسلها المستمر بواسطة الأمواج: حيث تتدرج من مواد بحصية إلى مواد رملية إلى مواد غضارية. أما في الشواطئ المحمية فتكون رسوباتها ناعمة جداً.

ب - رسوبيات الدلتا: تتجمع الرسوبات التي تحملها الروافد النهرية عند مصباتها في البحيرات وتشكل دلتا ذات بنية نموذجية، حيث تتألف من طبقات رملية وغضارية. ويمكن أن نميز فيها ثلاث مناطق رسوبية: ففي أعلى الدلتا هنالك طبقات قمة topset beds تكون قريبة من الوضع الأفقي، تليها طبقات شديدة الانحدار تسمى طبقات الواجهة foreset beds ثم طبقات القاع bottomset beds وتكون بوضعية موازية لارضية البحيرة. أما طبقات القمة فهي امتداد لرواسب النهر العادية، كما أن طبقات القاع امتداد لرواسب قاع البحيرة. وتبقى طبقات الواجهة هي الظاهرة المميزة للدلتا (شكل ٨ - ١).

تتألف رسوبات طبقات الواجهة من مواد خشنة يغلب فيها الرمل الغضاري، وقد تحفظ فيها المواد العضوية وغالباً لا يتم حفظها بشكل جيد.



شكل: (٨ - ١) يمثل رسوبيات الدلتا عندما يكون منسوب الماء ثابتاً.

إذا كان منسوب ماء البحيرة غير ثابت كثير التغير فإن رواسب الشاطئ تتوضع وفق فرز معين للفترة التي يثبت فيها منسوب الماء، وهذا لا يلبث أن يتهدم حين

تغير منسوب الماء، وعموماً تظهر الرسوبات الشاطئية بدون نظام، إنما تميز عن غيرها بموادها البحصية.

أما الدلتات فتصبح غير جيدة الوضوح بالنسبة لما هو عليه في البحيرات ثابتة المنسوب. وقد تتمثل طبقات الواجهة بعدسات من الرمل متداخلة مع رسوبات القاع، أو تأخذ شكل سلم متدرج حين يكون التغير باتجاه واحد صعوداً أو هبوطاً. وحين يكون التغير مضطرباً، فإن الرسوبات الدلتاوية تكون وضعياتها مشوشة متداخلة بتعقيد كبير. وبشكل عام تصبح منطقة الدلتا مؤلفة من رواسب متداخلة من طبقات ناعمة وخشنة تغلب عليها المواد الخشنة باتجاه النهر والمواد الناعمة باتجاه البحيرة.

أما رسوبات القاع فهي مؤلفة من مواد ناعمة من الفضار والرمل الناعم غسلت من الأجزاء الشاطئية. وهذه المواد يمكن أن يخالطها نسب من مواد متحلفة مثل كربونات الكلسيوم وأحياناً بعض المواد العضوية.

تُظهر توضعات القاع الناعمة شيئاً من الفرز الجيد والتطبيق الناعم، وكلاهما يعتمد على النظام السنوي للبحيرة. فالبحيرات ثابتة المنسوب أو ذات التغيرات المنتظمة تعطي رسوبات قاع ذات تطبيق متجانس إلى حد ما. أما البحيرات التي تقع في المناطق الباردة، حيث يتجمد ماؤها السطحي أيام الشتاء، فإن رسوبات القاع فيها تتطبق وفق تغيرات السنة، ويتناوب فيها عادة رسوبات غضارية تميز فترات الهدوء، ورسوبات سلتية رملية تمثل فترات النشاط، وكل ازدواج في التطبيق مؤلف من طبقات غضارية تليها طبقات رملية يمثل دورة سنوية كاملة. ويدعى هذا التطبيق بالتطبيق الموسمي أو الحولي الذي يستعمل في تحديد الأعمار المطلقة لرسوبات الرابحي في المناطق الجليدية.

أما في المناطق الاستوائية وتحت الاستوائية فترتبط تشكل العصابات الموسمية بالأشهر الممطرة والجافة خلال السنة. وفي بعض الحالات يرجع التطبيق إلى موت المتعضيات الحيوانية وحيدة الخلية والأشنيتات والطحالب الدقيقة في الخريف، مما يعطي اللون الأسود لرسوبات هذا الموسم.

وينعدم التطبيق في البحيرات كثيرة الأمواج بسبب اضطراب المياه الذي يمزج الرسوبات، وأيضاً في البحيرات المختوية على آكلات الأوحال mud - eaters.

### الترسيب الكيميائي

يضاف إلى الترسيب الحطامي في بحيرات المياه العذبة كميات هائلة من المعلقات الغروية، المولفة من البوكسيت واوكسيد الحديد المائي، وأحياناً هيدروكسيد المنغنيز، حيث توجد في قاع البحيرة على شكل تخرات كروية ذات بنية متمركزة، مشكلة مصدراً مهماً لخامات الحديد. ويعتقد أن البكتريات الحديدية تلعب دوراً في تشكيل هذه الخامات. وتوجد هذه الرسوبات بنسبة عالية في بحيرات المناطق الاستوائية لتوافر غطاء سميك من اللاهثريت الناجم من تجوية الصخور السيليكاتية.

أما في البحيرات قليلة الملوحة في المناطق نصف الجافة فيأخذ ترسيب كربونات الكلسيوم أهمية كبيرة.

تتميز مياه البحيرات في المناطق الجافة ونصف الجافة بدرجة عالية، من الملوحة حيث لا يوجد لها أنهار مصرفة، وتنقل الأمطار إليها الأملاح من التربة الملحية المجاورة لها. ويؤدي التبخر الشديد إلى إشباع زائد للمياه وتشكيل مياه شديدة الملوحة، يتبعها ترسيب كيميائي للأملاح مثل كربونات الصوديوم وكبريتات الصوديوم وكلور الصوديوم.

### الترسيب العضوي

تتميز بحيرات المياه العذبة في المناطق الرطبة بسماكات كبيرة من الرسوبات العضوية، تشتق من الكائنات العضوية الحيوانية والنباتية التي تعيش فيها، كالأسنانيات والطحالب بالإضافة إلى العضويات الحيوانية المعلقة، حيث تسقط بقاياها بعد موتها إلى قاع البحيرة مختلطة مع الغضاريات مشكلة أوحالاً عضوية (سابرويل Sapropel) وأكثرها يكون محتوياً على أبواغ نباتية وغبار طلع.

تبدأ البقايا العضوية المستقرة في قاع البحيرة بالتحلل بمعزل عن الهواء. وتلعب البكتريات اللاهوائية دوراً مهماً في تفكك المادة العضوية، حيث تأخذ الأكسجين

الداخل في تركيب المادة العضوية لتتفكسها، وتحولها إلى فحوم هيدروجينية، والتي تتبع بتحويل المادة العضوية جزئياً إلى مواد متفحمة. تتشكل السابروبيليات في البحيرات الصغيرة والضحلة، أما في البحيرات الكبيرة والعميقة، فتختلط بالرسوبات الطينية، وتبدو بشكل هلامي رمادي مخضر أو بشكل كتل بنية، ونتيجة لزيادة الضغط الناجم من تراكم الرسوبات فإنه ينضغط ويصبح قاسياً ويتحول إلى نوع من الفحم يعرف باسم السابروبيليت Sapropelite.

### زوال البحيرات:

تزول البحيرات للسببين الرئيسين التاليين:

١- ملئها باللحقيات التي تجلبها الأنهار الرافدة، كما حدث لبحيرة العتبية التي تمتلئ بلحقيات نهر بردى.

٢- انخفاض سوية الماء في البحيرة: تنخفض سوية الماء في البحيرة عندما يجفّر النهر المصرف بجراه في نقطة خروجه من البحيرة مسبباً بالتدريج قطع عتبتها. فإذا استمر انخفاض سوية الماء، فإن الرسوبات تمتد تدريجياً نحو مركز البحيرة، وتزول عندما تنضب مياهها.

## المستنقعات وأهميتها الجيولوجية

وهي منخفضات من سطح الأرض، تمتاز برطوبة عالية في النطاق العلوي من التربة والصخور، وينمو النباتات الغزير وتشكل التورب peat. وإن أحد المظاهر الرئيسة للمستنقعات هو تراكم التورب بسمكات كبيرة، مما يؤدي إلى نمو جذور النباتات فيه، ولا تصل إلى الصخور السفلية. وهناك مستنقعات صغيرة bogs

تكون سماكة التورب فيها قليلة وتصل جذور النباتات إلى القاعدة الصخرية. ولكن هذا التقسيم اسمي ويعد مرحلة من مراحل تطور المستنقعات.

تقدر المساحة المغطاة بالمستنقعات بنحو ١٧٥ مليون هكتار مربع منها ٧٢,٦٪ في المناطق الشمالية الغربية من روسيا، حيث توجد طبقات كثيفة قريبة جداً من سطح الأرض تساعد على تشكل المستنقعات.

### أنواع وتطور المستنقعات

تتطور المستنقعات في داخل القارات وفي المناطق الشاطئية المنخفضة. ويمكن أن تُصنف المستنقعات اعتماداً على نسبة المواد المغذية في مياهها، وغطائها النباتي وشكل سطحها إلى:

١- مستنقعات الأراضي المنخفضة Lowland bogs

٢- مستنقعات الأراضي المرتفعة Upland moors

٣- مستنقعات انتقالية Transition moors

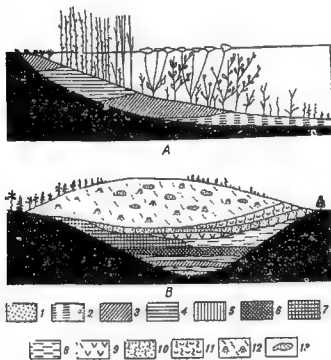
١- مستنقعات الأراضي المنخفضة: تتشكل هذه المستنقعات في انخفاضات تضاريسية، لها سطح منبسطة أو مقعر، وتستمد مياهها من مياه الأنهار بالإضافة إلى مياه الأمطار التي تكون غنية بالفلزات والعناصر المعدنية، وهو شرط رئيس لنمو النباتات ذاتية التغذية كالسعديات Sedges وأذنان الخيل Horsetails والطحالب الخضراء وأشجار النشم Alder والبتولا Birch. ويكون التورب المتشكل من النباتات ذاتية التغذية له قيمة حرارية منخفضة ويعطي كميات كبيرة من الرماد.

تتشكل أيضاً مستنقعات الأراضي المنخفضة في أحواض بحيرية تصبح تحت شروط معينة موضعاً لرسوب كثيف من الوحل والطين مشكلاً مع العوالق الحيوانية والنباتية أحياناً عضوية. ويصبح الوسط ملائماً لنمو النباتات المحبة للرطوبة وتدرجياً تغطي البحيرة بالنباتات وتحول إلى مستنقع (شكل ٨ - ٢).

أما في البحيرات ذات المناطق الشاطئية شديدة الانحدار، فإن تشكل المستنقعات فيها يتم وفق عمليات مختلفة، حيث تنمو في الأماكن الحممية من تأثير الرياح



والأمواج بعض النباتات الطافية مثل March & Cinquefail Calla ذات الجنود الطويلة مع الطحالب وغيرها من النباتات. وبهذا يتشكل غطاء نباتي عائم تزداد سماكته بتزايد كثافة النباتات ويأخذ بالانغماس تدريجياً، وتبدأ الأجزاء الميتة من الطبقات السفلية منه بالتحلل والسقوط إلى قاع البحيرة مشكلة طبقات رسوبية. ومع مرور الزمن يصبح سطح البحيرة مغطى بغطاء نباتي سميك متماسك وقاع البحيرة مغطى بسماكات كبيرة من الأوحال العضوية. وتبدأ النباتات جميعها بالتفسخ، معزل عن الأكسجين متحولة إلى التورب.



شكل ٨ - أ: رسم تخطيطي يمثل تشكل مستنقعات الأراضي المنخفضة  
ب: بنية المستنقع.

١- مارن مياه عذبة، ٢- ماريبوليت، ٣- تورب ماريبولي، ٤- أنواع مختلفة من التورب، ١٢- طحالبات مع جذل للصنوبريات، ١٣- تجمعات مائية موحلة على الغطاء الطحلي.

تتكون مستنقعات الأراضي المنخفضة بخاصة في المناطق المدارية وتحت المدارية،

إذ تغزو المناطق المنخفضة لشواطئ الأطلسي في شمال أمريكا وفي جزر اندونيسيا وغيرها من المناطق.

## ٢- مستنقعات الأراضي المرتفعة:

تشكل هذه المستنقعات في مجتمعات مائية لها سطح مقعر. وهي تنجم من تقاطع منسوب الماء الجوي مع منخفض تضريسي، وتكون المياه في هذه الحالة فقيرة بالمواد الغذائية، لذلك تنمو فيها النباتات فقيرة التغذية *oligotrophic* والطحالب *sphagnum*. ويكون الثورب المتشكل من هذه النباتات ذا قيمة حرورية مرتفعة ويعطي كميات قليلة من الرماد.

## ٣- مستنقعات الغدائية:

تنمو فيها النباتات متوسطة التغذية *mesotrophic* حيث تحتاج إلى كمية قليلة نسبياً من المواد الغذائية.

ويمثل هذا التصنيف في حقيقته مراحل مختلفة من تطور المستنقعات يمكن اختصارها فيما يلي:

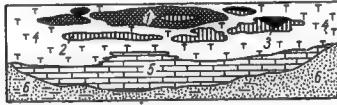
تأخذ النباتات في مستنقعات الأراضي المنخفضة موادها الغذائية في مرحلة معينة من الأوجال البحرية. وعندما تنمو فيها طبقات الثورب بسماكات أكبر، فإن شروط التغذية تتغير ولا تستطيع النباتات الوصول إلى الأوجال البحرية، إذ تأخذ موادها الغذائية من الثورب، وكل جيل جديد من النباتات يستخرج موادها الغذائية من الجيل القديم. وبالنهاية يصل الوسط إلى مرحلة تنخفض فيه نسبة العناصر الغذائية، مما يؤدي إلى ظهور نباتات متوسطة التغذية ومع نضوب المواد المغذية تظهر نباتات فقيرة التغذية، وبهذا تنتقل من نوع لآخر من المستنقعات.

## التوضعات المستنقعية

يشمل الترسيب المستنقعي رواسب كيميائية المنشأ إضافة إلى الرواسب عضوية المنشأ. ويشار إلى النوع الأول منها بالكلس أو المارن المستنقعي، ويكون أصلهما

مرتبطاً بمركبات تنقل إلى المستنقعات بوساطة المياه الجوفية، أو بوساطة المياه الجارية السطحية التي تكون غنية بمركبات كربونات الكالسيوم.

ويوجد أيضاً في المستنقعات رسوبات حديدية نقلت إليها بوساطة المياه تحت السطحية، وهي تتوضع على شكل كرات صغيرة من السيديريت غالباً، وتكون مختلطة مع الأوحال العضوية مشكلة خامات الحديد المستنقعية. وعندما يتعرض هذا السيديريت إلى الهواء الجوي يتأكسد معطياً الليمونيت. ويتشتر في رسوبات البيئات المستنقعية المرجعة فاز الفيبيانيت Vivianite وهو فوسفات حديدية مائية  $Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$  ويظهر أحياناً مرافقاً للسيليريت وغيره من فلزات أكاسيد الحديد. ويتوضع عادة على شكل بقع ترابية صغيرة بلون أزرق، ويوجد أحياناً على شكل عدسات كما هو واضح في الشكل (٣-٨). ويحتمل أن يكون مصدر المركبات الفوسفاتية هذه من البقايا العضوية.



شكل ٣-٨: يوضح التوضعات المستنقعية في مناخ رطب

١- فيليفيت، ٢- سديريت، ٣- خام الحديد، ٤- تورب، ٥- طين مستنقعي، ٦- رمل وخشخاش

### التورب وتشكله:

يأخذ التورب أهمية كبيرة بالمقارنة مع أنواع رسوبات المستنقعات، وينشأ من تراكم بقايا النباتات المستنقعية التي تخضع في مراحل متأخرة إلى مجموعة معقدة من عمليات التفسخ.

حين تخضع النسخ النباتية المؤلفة كيميائياً من الكربون والاكسجين والهيدروجين والأزوت إلى التفسخ بعلامسة الهواء، تتفكك إلى مركبات لاعضوية مثل ثنائي اوكسيد الكربون والماء وغيرها.

أما في البيئات المستنقعية، وبخاصة في أمكنة التراكم، فإن الوسط يفتقر للاوكسجين في الأماكن السفلية من الطبقات المتراكمة، حيث تخضع البقايا النباتية إلى التفسخ والتحول تحت تأثير العضويات الدقيقة، مثل البكتريات والعفن مما يؤدي إلى تناقص تدريجي للاوكسجين من تراكيب هذه البقايا، وبالتالي تزايد تدريجي لنسبة الكربون المثبت التي ترتفع لتصل إلى ٥٧٪ وأحياناً إلى ٥٩٪. مع الإشارة إلى أن جزءاً من مواد هذه البقايا قد يقاوم التفسخ كلياً أو جزئياً وبخاصة المواد الخشبية. ويقود هذا التفسخ اللاهوائي للبقايا النباتية إلى تشكل مواد دبالية، وهي مواد رئيسة في التورب. وتدعى عمليات التحول إلى تورب بالتحول الدبالي humification وتعد مرحلة أولى وأساسية في تشكل الفحم الحجري. وهكذا نجد أن التورب يمثل بقايا نباتية نصف متفسخة، لونها بني أو مائل للأسود، ويصنف عادة حسب النباتات التي أدت تراكمات بقاياها إلى شكله. هذا وتصل سماكات بعض تراكمات التورب إلى عشرة أمتار وأحياناً إلى أكثر من ١٥ متراً. ويستفاد من طبقات التورب كمادة للوقود والتدفئة، كما يستخلص منه صناعياً مواد متنوعة مثل الكحول والفينول والبارافين وغيرها، ويستفاد منه أيضاً كمادة عازلة للحرارة وكمادة مخصبة للترية.

# الْقِسْمُ الثَّانِي

العوامل الجيولوجية الداخلية

أو

الجيوديناميك الداخلي



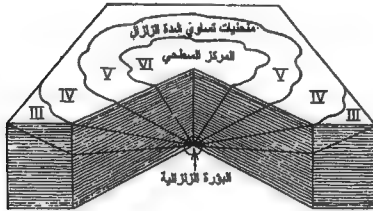
# الفصل التاسع

## الزلازل

بحثنا في القسم الأول من هذا الكتاب العوامل الخارجية التي تؤدي إلى تغيرات مستمرة في سطح القشرة الأرضية، من حث ونقل وترسيب وظواهر جيومورفولوجية متنوعة. وتستمد هذه العوامل الخارجية طاقاتها من الإشعاع الحراري للشمس وحركة الرياح والأمطار والمياه والتفاعلات الكيميائية وفعل العضويات. أما في هذا القسم فسوف نبحث في العمليات الداخلية التي تستمد طاقتها من باطن الأرض، من حرارة ونشاط مغماتي وعمليات إعادة توازن التي تؤدي إلى ظواهر معروفة كالزلازل والبراكين وحركات القشرة الأرضية.

الزلازل earthquakes هي حركات أرضية فجائية سريعة وحاطفة، قد تؤدي إلى كوارث هائلة. وقد تكون خفيفة في رجات منلرة مصحوبة بضحيح جويي بينما تكون أحياناً عنيفة ومدمرة.

حين حدوث زلزال أرضي في منطقة ما، فإنه يكون أقسى ما يمكن في البؤرة focus التي تكون في باطن الأرض وعلى أعماق مختلفة، حيث تنتشر الموجات الاهتزازية منها في جميع الاتجاهات، وأما على سطح الأرض فتكون الهزة أعظمية في المركز السطحي epicentre. وهي المنطقة التي تعلق بؤرة الزلزال.



شكل ١-٩: مصمم يبين منحنيات تساوي للزلازل وعلاقتها مع المركز السطحي والموجات الصادرة عن البؤرة الزلزالية.

### مصدر الزلازل

عندما يحدث زلزال في منطقة ما، يشعر الإنسان كأن الأرض قد ضربت بمطرقة هائلة أدت إلى هزها بشكل قوي في مساحة واسعة. ومن أجل تبسيط ذلك من

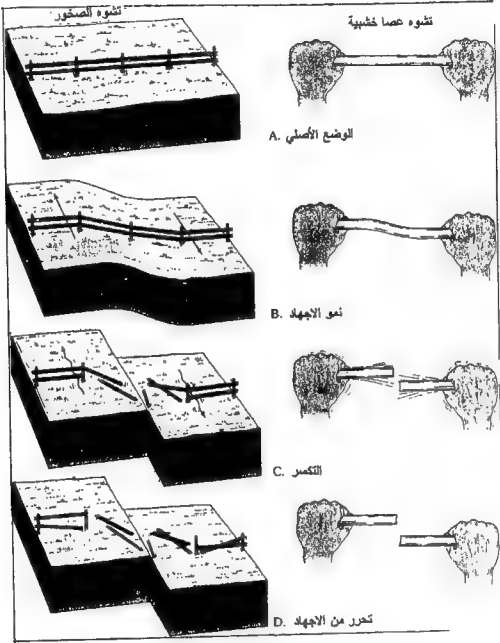


الناحية العملية يمكن إجراء تجربة بسيطة على لوح من الخشب أو على سطح منضدة، فنضرب على طرفها بمطرقة ونضع يدنا على الطرف المقابل حيث نشعر بهتزاز هذا الجسم الصلب، وكلما كان الجسم أكثر صلابة كان انتشار الاهتزاز فيه أقوى. إن سبب انتقال الموجات الاهتزازية في الأجسام الصلبة هو الطاقة المتحررة من ضرب المطرقة التي أدت إلى تشوه مرن في هذه الأجسام عند مرور الموجات الاهتزازية فيها. أما في حالة اهتزاز الأرض فلا توجد مطرقة تناسب ذلك، إنما يمكن لانفجار بركاني مفاجئ أو انهيار صخري ضخم أو حتى انفجار قنبلة أن تؤدي إلى تحرر طاقة تحدث اهتزازاً في الأرض. كما أن انزلاق الكتل الصخرية الضخمة الموجودة على جانبي الفالق بالنسبة إلى بعضها بعضاً يولد طاقة اهتزازية في الأرض.

إن الحركات المفاجئة التي تحدث في القشرة الأرضية بتتجة انزلاق الكتل الصخرية على جوانب الفوالق هي المسؤولة عن حدوث معظم الزلازل. إلا أن حدوث الزلازل ليس بهذه البساطة من التعميم، فبعض الزلازل أقوى بملايين المرات من زلازل أخرى، وفي حالة كهذه يجب أن تكون الطاقة المتحررة ناجمة من ألوف الانزلاقات الفالقية، أو أنها تمثل تخزيناً للطاقة على مدى زمني طويل نسبياً لتتحرر فجأة في زلزال واحد. يضاف إلى ذلك أن السطوح الصخرية على جانبي الفالق لا تنزلق بالسهولة التي يمكن تصورها. فالطاقة المتولدة من الضغوط على الأجسام الصخرية تُختزن في أجسام الصخور بالتشوه المرن مثلها كممثل نابض فولاذي أخضع للانضغاط بشكل تدريجي وتغير شكله ليعود إلى شكله الأصلي بعد زوال الضغط عنه.

وقد أتت فكرة تخزين الطاقة في الصخور بالتشوه المرن من الدراسات المطولة التي أجريت على فالق سان اندرياس San Andreas Fault في كاليفورنيا عام ١٨٧٤، كما حدد العالم ريد Reid وهو أحد الباحثين في زلزال سان فرانسيسكو عام ١٩٠٦ ولأول مرة كيفية حدوث الحركة على امتداد هذا الفالق. فقد اقترح هذا العالم نظرية الارتداد المرن elastic rebound theory المولدة للزلازل. وقد لاقت هذه النظرية قبولاً جيداً لتفسير حدوث الزلازل. وإن الشكل (٩-٢) يوضح

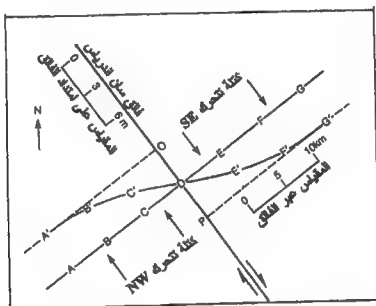
هذه النظرية.



شكل ٧-٩: رسم يوضح نظرية الارتداد المرن.

تتشق الصخور تحت تأثير الجهود المطبقة، كما تتثنى عصا خشبية، وتخزن طاقة بالتشوه المرن وعندما يتم التغلب على القوى التي تشد الصخور إلى بعضها بعضاً تتكسر وتزلق على بعضها بعضاً محررة للطاقة المخزنة، وعندما تعود الصخور إلى حالة الاستقرار ثلثية.

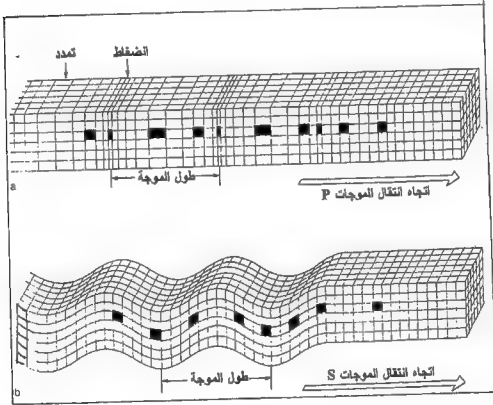
تشمل هذه النظرية أن صخور القشرة الأرضية على جانبي فائق رئيس تكون تحت وطأة جهود مطبقة، قد تكون في اتجاهين متعاكسين. فالطاقة المتولدة من هذه الضغوط تختزن تدريجياً بالتشوه المرن مثل شريط مطاطي مشدود، ومع مرور الزمن يحصل إجهاد في الصخور فتتمزق وتنزلق الكتل الصخرية على امتداد الفائق خلال ثوان أو دقائق على الأكثر. وتحرر من جراء ذلك الطاقة المختزنة لتعود هذه الكتل إلى حالة الاستقرار بجانب بعضها بعضاً بوضعية غير بمجهد. ومع استمرار الضغوط تختزن الطاقة مرة ثانية وهكذا. وكل حركة مفاجئة ينجم منها زلزال أرضي كما يحدث على امتداد فائق سان اندرياس (شكل ٣-٩).



شكل ٣-٩: زلزال نجم من تحرر الطاقة. هذا الرسم مبني على قياسات مسلمية لتصلية قرب فائق سان اندرياس بكاليفورنيا قبل وبعد الحركة المفاجئة التي أتت إلى زلزال عام ١٩٠٦. إن النقاط الملامعة السبع من A إلى G كانت على خط واحد. وقد أتت الحركة البطيئة لكتلتي الفائق إلى إنحاء القشرة الأرضية وإزالة النقاط إلى الوضعية الجديدة A'G'. وإن قوى الاحتكاك على جانبي الفائق تمنعها من الانزلاق المستمر. وبشكل فجائي تحطم هذا التماسك الاحتكاكي وارتدت الصخور على جانبي الفائق إلى وضعية الاستقرار. وأصبحت النقاط الملامعة على امتداد القطعين A'O و PG'، أي بمقدار زلزلة OP.

## الموجات الزلزالية

تنتقل الطاقة المتحررة من إجهاد الصخور وتزفها على سطح الأرض وفي باطنها على شكل موجات تسري في الأجسام الصلبة في مختلف الاتجاهات بدءاً من موقع التمزق. وقد تمكن العلماء في مطلع القرن الحالي من تحري هذه الموجات. وقد وجدوا من خلال دراساتهم أن هناك مجموعتين رئيسيتين من الموجات الزلزالية التي تنشأ من انزلاق الكتل الصخرية، فالأولى منها تنتقل عبر طبقات سطح الأرض وتعرف بالموجات السطحية surface waves، والثانية تنتقل عبر طبقات تحت سطح الأرض وتعرف بالموجات الجسمية body waves.

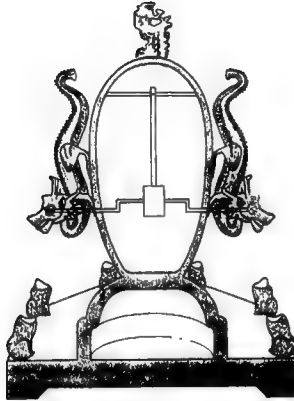


شكل ٩-٤: رسم توضيحي يبين الاختلاف بين الموجات الأولية والموجات الثانوية.  
أ - الموجات الأولية      ب - الموجات الثانوية.

تنقسم الموجات الجسمية إلى نوعين وهما الموجات الأولية والموجات الثانوية وذلك حسب طبيعة انتشارها عبر المواد. فالموجات الأولية *primary waves* هي موجات انضغاطية يكون فيها اهتزاز الجزيئات إلى الأسفل والخلف في اتجاه انتقال الموجات مثل الموجات الصوتية وتؤدي إلى التغير في الحجم ويرمز لها بالحرف (P). وتنتقل في الأجسام الصلبة والسائلة والغازية. أما الموجات الثانوية *secondary waves* فهي أبطأ من الموجات الأولية، ويكون فيها اهتزاز الجزيئات باتجاه عمودي على اتجاه انتقال الموجات (شكل ٩-٤). ولا تنتقل إلا في الأجسام الصلبة وتؤدي إلى التشوه الدائم وتغير في الشكل. وسميت بأمواج القص *shear waves* ويرمز لها بالحرف (S). أما الموجات السطحية فهي أكثر تعقيداً من الموجات العميقة، فهي موجات تخرج من المركز السطحي للهزة وتنتشر عبر طبقات سطح الأرض بسرعة أقل من الموجات العميقة ويرمز لها بالحرف (L). وتكون حركة الموجات إلى الأعلى والأسفل، وتتحرك أيضاً من جانب لآخر. ولهذا فهي تؤدي إلى حركة سطح الأرض وجميع الأشياء الواقعة فوقه وتلحق أضراراً بالمباني والمنشآت.

### رأسم الزلازل Seismograph

يجري تسجيل الموجات الزلزالية بجهاز خاص يرسم حركة الأرض أثناء حدوث الزلازل وهو جهاز السيسموغراف الذي صمم عام ١٨٩٧ من قبل العالم الانكليزي ميلن *Milne*. وهنا لا بد من ذكر الخيرة القديمة للصينيين في قياس الزلازل. حيث صمم أول جهاز لتحري الزلازل منذ أكثر من ١٨٠٠ سنة من قبل العالم والفيلسوف شانغ هينغ *Chang Hing*، وأطلق عليه في ذلك الوقت ديهك الطقس الزلازلي *earthquake weather cock* (شكل ٩-٥).

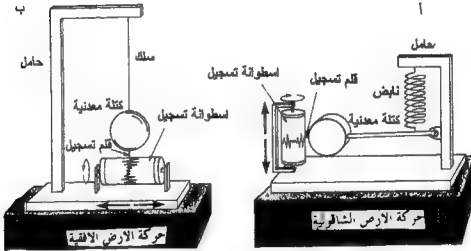


شكل ٥.٩: الجهاز الصيني القديم لتحري حدوث الزلازل ومعرفة اتجاهها.

يتألف من جرة كبيرة مجوفة قطرها (٢م) مثبت على سطحها الخارجي وبمسافات متساوية ثمانية تينينات dragons تحمل في أفواهها كرات، ومتصلة بكتلة معدنية في داخل الجرة. فعند وصول الموجات الاهتزازية إلى الجهاز تتحرك الكتلة المعدنية وهي بدورها تحرك فكي اللتين الذي يقع في اتجاه الهزة، فتسقط الكرة من فمه إلى فم الضفدع المنتظر تحته.

أما راسم الزلازل الحديث فيتألف من ثلاثة أجزاء رئيسية وهي ١- كتلة معدنية ثقيلة يصعب تحريكها ٢- إطار متين مثبت بالأرض ٣- وسيلة تسجيل (شكل ٩-٦). أما الكتلة المعدنية فتكون مثبتة ومشدودة بسلك إلى عمود قائم ثبت في قاعدة من الاسمنت وهي بدورها مثبتة في الأرض. تحمل الكتلة المعدنية، في الأجهزة القديمة، ذراعاً تنتهي بكرة تحتك بصورة خفيفة على لوحة تسجيل مثبتة على اسطوانة تدور ببطء حول محور. أما في الأجهزة الحديثة، فتتصل الكتلة المعدنية بلذراع تحمل مرآة صغيرة تعكس

حزمة ضوئية دقيقة على ورقة تصوير ملفوفة على الاسطوانة المثبتة في القاعدة الاسمنتية. فعندما تكون القشرة الأرضية في حالة ثبات فإن الأبرة أو الحزمة الضوئية ترسم خطاً مستقيماً. فإذا اهتزت القشرة الأرضية اهتزت معها اسطوانة التسجيل ورسمت الأبرة أو الحزمة الضوئية خطاً متعرجاً على ورقة التصوير. ويعرف هذا الخط بالسيسموغرام seismogram. وفي الوقت نفسه يقوم مسجل زمني بتسجيل الوقت الذي تبدأ فيه الهزة، والوقت الذي تنتهي عنده.



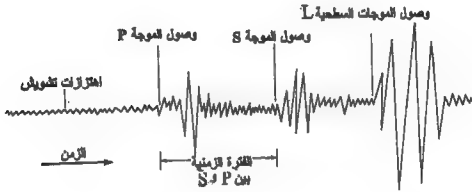
شكل ٦-٩: رسم يوضح كيفية عمل السيسموغراف

أ - سيسموغراف مصمم لتسجيل الحركة الشاقولية للأرض.  
ب - سيسموغراف مصمم لتسجيل الحركة الأفقية للأرض.

ونظراً لأن الزلازل تحدث حركات شاقولية وحركات أفقية، فإنه توجد حاجة إلى أكثر من نوع من السيسموغراف. فمحطات الرصد الزلزالي الجيدة يجب أن تتألف من ثلاث وحدات سيسموغرافية منها وحدتان أفقيتان موجّهتان شمالاً - جنوباً، وشرقاً - غرباً لتسجيل الحركات الأفقية كافة. والوحدة الثالثة لتسجيل الحركات الشاقولية.

## تحديد مصدر الزلازل

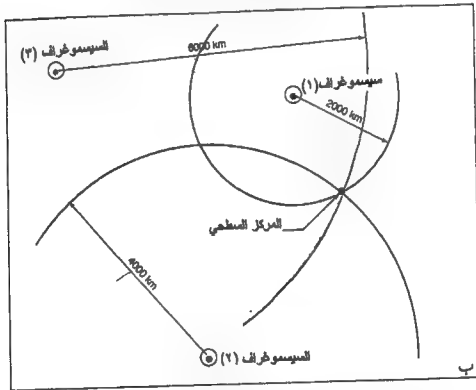
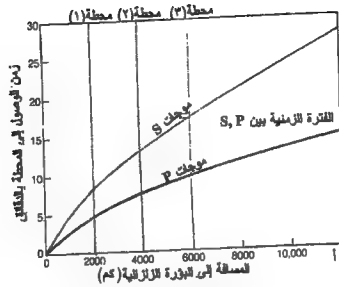
لقد ذكرنا أن سرعة الموجات الأولية أكبر من سرعة الموجات الثانوية، فمن الطبيعي أن تصل الموجات الأولية إلى محطات التسجيل قبل الموجات الثانوية (شكل ٧-٩). وبصورة عامة تنتقل الموجات الأولية في المواد الصلبة بسرعة تعادل (١,٧) ضعفاً من سرعة للموجات الثانوية. وكلما كان مسار انتقال الموجات طويلاً زاد الفارق الزمني بين وصول الموجات الأولية والثانوية.



شكل ٧-٩: سجل زلزالي نموذجي بين الفرق الزمني بين وصول الموجات P و S.

وقد استفاد العلماء من هذا الفارق الزمني في تحديد بعد المركز السطحي عن مركز الرصد الزلزالي. ولكن تحديد بعد المركز السطحي عن مركز الرصد غير كاف من أجل تحديد موقع هذا المركز على سطح الأرض. ويمكن تحديد هذا الموقع بدءاً من ثلاث محطات تقع حولها، حيث ترسم ثلاث دوائر يكون مركزها المرصد ونصف قطرها يساوي بعد المحطة عن المركز السطحي. وتكون النقطة التي تقاطع فيها هذه الدوائر هي موقع المركز السطحي (شكل ٨-٩).





شكل ٨-٩: يوضح الطريقة المستعملة في تحديد المركز السطحي للزلزال.

أ - تحديد بعد المركز السطحي عن محطة الرصد.

ب - تحديد مواقع المركز السطحي من تقاطع ثلاث دوائر.

## شدة الزلازل ومقدارها

أ - شدة الزلازل: حاول العلماء منذ نهاية القرن الثامن عشر وضع عدد من المقاييس لتقدير شدة الزلازل earthquakes intensity التي تعتمد على الأضرار التي تنجم عنها ومدى احساس الانسان بها. فقد وضع العالمان روسي وفوريل Rossi & Forel سلماً لتصنيف الزلازل إلى عشر درجات تبدأ بالزلازل الخفيفة التي لا يمكن كشفها إلا بواسطة أجهزة التسجيل وتنتهي بالهزات المفجعة التي تؤدي إلى دمار شامل. ولكن أحرزت تعديلات على هذا السلم من قبل العالم الايطالي مركاتلي Mercalli حيث صنفت فيه الزلازل في اثني عشرة درجة.

الدرجة ١- يكون الزلزال غير ملحوظ ويتألف من هزات مجهرية لا تسجلها إلا الأجهزة.

الدرجة ٢- يكون الزلزال ضعيفاً جداً. يشعر به عدد قليل من أناس عصبي المزاج وهم في حالة من الهدوء.

الدرجة ٣- يكون الزلزال ضعيفاً، يشعر به بعضهم في داخل المباني وبخاصة في الطوابق العليا.

الدرجة ٤- يكون الزلزال معتدلاً، يُلاحظ قليلاً خارج المباني ويكون أكثر وضوحاً في داخل المباني، (ترتجف الأبواب والرجاج وترن الصخور رنيناً خفيفاً) ويشعر الناس به بما يشبه اصطدام شاحنة بمبنى اسمنتي.

الدرجة ٥- يكون الزلزال قوياً تقريباً، يشعر به كل إنسان، ويسبب ايقاظ النائمين وقرع أجراس الكنائس، ويهز جميع الأشياء التي لها ارتفاع كبير.

الدرجة ٦- يكون الزلزال قوياً يشعر به الجميع وتتكسر الأواني والصحون وتتشقق طلاءات الجدران ويؤدي إلى اضطراب في أثاث المنزل.

الدرجة ٧- زلزال قوي جداً. ويؤدي إلى دعر عام، وينقلب فيها أثاث البيوت، وتتشقق الجدران وتهدم الأبنية ضعيفة الأساس.

الدرجة ٨ - يكون الزلزال مخرباً ويحدث دماراً خفيفاً في المباني جيدة التصميم، وتهدم المباني الضعيفة الأساس وجزء من المباني العادية، وتتهار النصب التذكارية وأعمدة للمصانع والدعامات.

الدرجة ٩- يكون الزلزال مدمراً تتأثر به المباني الحجرية بشدة وقد يؤدي إلى هبوطها في أماكن التشققات الأرضية.

الدرجة ١٠- زلزال كارثي. يؤدي إلى شقوق عريضة في سطح الأرض، وتهدم كثير من المباني، والتواء السكك الحديدية وانزلاقات في الأراضي على طول المنحدرات.

الدرجة ١١- زلزال مدمرة لا يبقى سوى عدد قليل من الأبنية الصامدة، وشقوق عريضة في القشرة الأرضية وانزلاقات أرضية عديدة.

الدرجة ١٢- يسبب الزلزال في هذه الدرجة دماراً شاملاً. وتبلغ فيها تشوهات القشرة الأرضية أبعاداً هائلة ولا يسلم منها أي بناء.

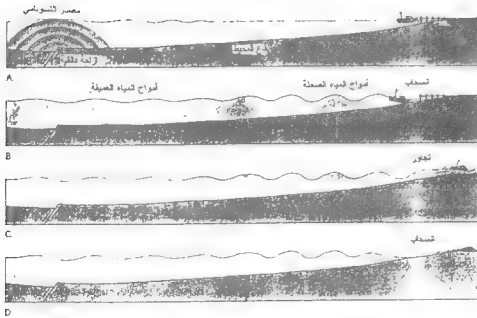
وعلى هذا الأساس، فإن بالامكان، عند حدوث زلزال أرضي، أن نميز نطاقات محددة كل منها بشدة أفعال الزلزال، ويمكن تمثيل حدود هذه النطاقات على خريطة بواسطة منحنيات تدعى منحنيات تساوي شدة الزلزال (شكل ٩-١)، وتشاهد الأفعال الأعظمية في النطاق المركزي الذي يحيط بالمركز السطحي للزلزال.

إذا أمكننا من معرفة لحظات تلقي الزلزال، وجمعنا على خريطة النقاط التي تم فيها الاحساس بالزلزال في وقت واحد، فإن بإمكاننا أن نرسم منحنيات تساوي شدة الزلزال التي تعطي معلومات دقيقة عن سرعة انتشار الموجات الإهتزازية. وتبين هذه الموجات بأن السرعة تتغير مع طبيعة الأراضي التي تخترقها الموجات، وأن خطوط التخلعات التكتونية تعكس للموجات الإهتزازية.

عند مراقبة اتجاه وميل الشقوق التي أحدثها الزلزال في سطح الأرض، يصبح من الممكن بصورة تقريبية، تحديد موقع البؤرة الزلزالية. ويعتقد أن هذه البؤرة تقع داخل

## الجسم الصلب للغلاف الصخري Lithosphere.

وعندما يحدث الزلزال في البحر فإنه يسبب أمواج مد tidal waves تصل إلى ارتفاع كبير جداً تدعى تسونامي Tsunami. وإذا رافق وجود الزلزال تغيرات عنيفة في قاع المحيط بخاصة حدوث صدع في قاعه، فإن كتلة الماء تقور فجأة في المكان الهابط، ثم تدخل في حركة اهتزازية. وعند الاقتراب من الشاطئ، حيث يتناقص عمق البحر، وتتناقص كتلة الماء، فإن سعة الموجة الاهتزازية تزداد ازدياداً كبيراً، يمر من متر واحد إلى عشرات الأمتار أحياناً (شكل ٩-١٠). فتسبب في هذه الحالة أضراراً بالغة على الشواطئ التي تبلغها. كما حدث في حزيران عام ١٨٩٦ على شاطئ المحيط الهادي شمال اليابان. حيث طغى البحر على خط الشاطئ بسرعة ووصل إلى ارتفاع استثنائي لم يصل إليه في أي وقت مضى. وقد أدت أمواج المد هذه إلى قتل نحو ٢٧١٢٢ شخصاً وجرح الآلاف وجرف نحو ١٠٦١٧ منزلاً ودمر كثيراً غيرها.



شكل ١٠-٩: رسم تخطيطي لموجات التسونامي الناتجة عن زلاحة قاعية في قاع المحيط.

ب - مقدار الزلازل **Magitude**: يعطينا مقياس ميركالي معلومات جيدة حول التأثيرات التي تسببها الزلازل في المباني والمنشآت. إلا أن معظم الزلازل تحدث في مناطق غير مأهولة. يضاف إلى ذلك أن عوامل مختلفة يمكن أن تؤدي إلى أضرار متفاوتة، منها البعد عن المركز السطحي وطبيعة الأراضي التي تخترقها الموجات الزلزالية ونوعية المباني والمنشآت. ثم إن هذا المقياس لا يوفر المعلومات اللازمة عن الحركات الموجية الزلزالية ومقدار الطاقة المتحررة. وقد أدى ذلك إلى وضع طرائق لتحديد كمية الطاقة المتحررة بواسطة الزلازل، ويعبر عن هذا القياس بالمقدار **mgitude** الذي يرتبط بسعة الموجات الزلزالية. ويستعمل اليوم مقياس ريختر **Richter Scale** لوصف مقدار الزلازل، الذي استعمل فيه أجهزة ذات تقاينة خاصة، يتم بواسطتها قياس الموجة الزلزالية قياساً علمياً موضوعياً مميزاً بأرقام سواء أكان حدوث الزلازل في مناطق معزولة مثل سيريا أم في مدن مكتظة بالسكان مثل سان فرانسيسكو. ويتم حساب المقدار بتقدير قيمة سعة أكبر موجة زلزالية ترسم على جهاز سيسموغراف خاص الذي يفرضه ريختر أنه يقع على مسافة (١٠٠) كيلومتر من المركز السطحي للزلازل. وبما أن الزلازل تختلف بشكل كبير في قوتها فإن سعة الموجات الزلزالية المتولدة تتغير الوف المرات أيضاً، ولاستيعاب هذا التغير الواسع فقد استعمل هذا العالم مقياساً لوغاريتمياً للتعبير عن المقدار، فعلى هذا المقياس فإن ازدياد عشرة أضعاف السعة الموجية يقابل وحدة واحدة في مقياس المقدار، لذلك فإن سعة أكبر موجة سطحية لزلازل مقداره (٥) هي أكبر بعشر مرات من السعة الموجية الناتجة من زلزال مقداره (٤). إضافة إلى ذلك فإن وحدة واحدة من مقياس ريختر تعادل تقريباً زيادة (٣٠) مرة من الطاقة المتحررة. وعلى هذا فإن زلزال مقداره (٧,٥) يحرر طاقة أكبر بـ (٣٠) مرة من الطاقة المتحررة بزلزال مقداره (٦,٥) وأكبر بـ (٢٧٠٠٠) من الطاقة المتحررة من زلزال مقداره (٤,٥). ومن حسن الحظ أن الزلازل التي تزيد سعتها تنقص في ترددها (جول ١-٩). وفي كل عام يحدث نحو (٨٠٠,٠٠٠) زلزال بمقدار (٣,٤) أو أقل، تسجلها الأجهزة ولا يشعر بها الناس في مناطق حدوثها.

مقدار الزلزال	معدل حدوثها السنوي	للسلحة للتأثرة (كم <sup>2</sup> )	الطاقة المتحررة بالإرغمة
٣ - ٣,٩	٣.٠٠٠	١٩٥٠	$١٧١٠ \times ١,٨ - ١٣١٠ \times ٧,٩$
٤ - ٤,٩	٤٨٠٠	٧٧٧٠	$١٨١٠ \times ٥,٦ - ١٧١٠ \times ٢,٥$
٥ - ٥,٩	٥٠٠	٣٨٨٥٠	$٢٠١٠ \times ١,٨ - ١٨١٠ \times ٧,٩$
٦ - ٦,٩	١٠٠	١٢٩٥٠٠	$٢١١٠ \times ٥,٦ - ٢٠١٠ \times ٢,٥$
٧ - ٧,٩	١٨	٥١٨٠٠٠	$٢٣١٠ \times ١,٨ - ٢١١٠ \times ٧,٩$
٨ - ٨,٩	واحدة في كل سنة (١٠٠ سنة)	٢٠٧٢٠٠٠	$٢٤١٠ \times ٥,٦ - ٢٣١٠ \times ٢,٥$

جدول ١٠٨: مقدار الزلازل وتواترها السنوي ونسبة الطاقة المتحررة.

وهناك اعتقاد شائع بأن تكرار حدوث الزلازل الخفيفة يمنع حدوث الزلازل الشديدة، حيث تبذل الطاقة المختزنة في الصخور. فإذا تذكرنا أن حدوث زلزال مدمر مقداره (٨) يحرر من الطاقة ما يعادل (٨١٠٠٠٠) ضعفاً مما يحرره زلزال مقداره (٤). فإذا افترضنا أن زلزالاً مقداره (٨) يحدث كل (١٠٠) سنة. وعلى ذلك يكون تبديد الطاقة التي يمكن أن تسبب زلزالاً بالدرجة (٨) يتطلب حدوث (٨١٠٠) زلزالاً مقداره (٤) كل سنة. وهذا العدد هو أكبر من عدد الهزات المتوقع حدوثها في العالم. وبذلك نستطيع أن نستنتج أن المخزون الضخم للطاقة لا يمكن أن يتحرر إلا عن طريق زلزال مدمر ولا يمكن للزلازل الخفيفة أن تقوم بدور صمام أمان يحمي من حدوث الزلازل للمدمرة.

### الأحزمة الزلزالية Earthquake belts

لا تنتشر الزلازل بصورة عشوائية على سطح الأرض، وإنما نجد أن مراكزها تتوزع في ثلاثة نطاقات تتكرر فيها حدوث الزلازل من وقت لآخر. تعرف هذه النطاقات بالأحزمة الزلزالية. وتكون هذه الأحزمة مترافقة مع النشاط البركاني والسلاسل الجبلية حديثة التكوين وهي: ١- حزام زلزالي يطوق المحيط الهادي. ٢- حزام زلزالي عرضي

تكتاد يمشي مع السلاسل الجبلية حديثة التكوين. ٣- حزام زلزالي يمتد على طول  
الأمم مرتفعة وسط المحيط الأطلسي من الشمال إلى الجنوب (شكل ١٩-١ ص ١٠).

١- حزام المحيط الهادي أو حلقة النار: وهي مناطق تكون فيها الزلازل عنيفة جداً.  
ويعتد هذا النطاق من شيلي إلى أمريكا الوسطى، المكسيك، كاليفورنيا، غرب  
كندا، الأسكا، جزر اليابان، الفيلبين، أندونيسيا ونيوزلندا. ويسمى هذا النطاق  
أيضاً حلقة النار. ويحدث فيه أكثر من ٧٥٪ من زلازل العالم.

ولقد قام العالمان غوتنبرغ وريختر عام ١٩٤٩ بدراسة أطراف المحيط الهادي  
بصورة خاصة، وانتهيا إلى وضع خرائط تبين مواقع الزلازل الضحلة التي يتراوح  
أعماق بؤرها الزلزالية من (٠ - ٧٠ كم) والزلازل المتوسطة من (٧٠ - ٣٠٠ كم)  
والزلازل العميقة من (٣٠٠ - ٧٠٠ كم). وقد تبين لدى الدراسات التي تمت من قبل  
مرصد لامونت دورتي Lamont Doherty عام ١٩٨٦ أن توزع الزلازل من  
الأسكا وباتجاه الطرف الغربي للمحيط الهادي، وفي الشاطئ الشرقي منه الممتد من  
أمريكا الوسطى إلى أمريكا الجنوبية، تتبع الحنادق المحيطية العميقة ومرافقة مع  
الأقواس العركانية. وتحدث في الجانب القاري من الحندق المحيطي (شكل ٩-١٢).



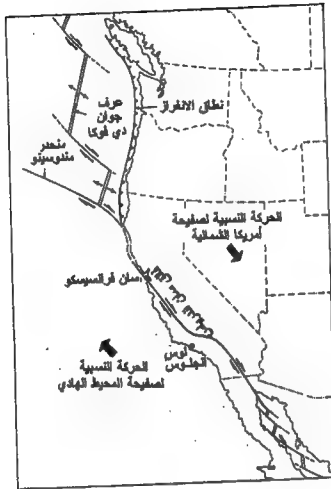
شكل ١٢-٩: الحنادق المحيطية في العالم

إن الخنادق المحيطية هي الأماكن التي تنحني فيها الصفائح المحيطية وتغوص في المعطف. وقد وجد العلماء أن مركز الصفيحة المنغرضة، التي تبلغ سماكتها نحو (١٠٠) كيلومتر، وتغوص بمقدار بضعة سنتيمترات سنوياً، سيبقى صلباً حتى عمق (٧٠٠-٦٠٠) كيلو متر. أي أنه في هذه الحالة يمكن أن تحدث زلازل ذات بؤر عميقة من خلال تحرير الطاقة المرنة التي اختزنت في الصفيحة الصلبة الهابطة أثناء مقاومتها لحركة الجبوت. وبالوقت نفسه تحدث زلازل ضحلة في الصفيحة القارية نتيجة الإجهاد الناجم من انغراز الصفيحة المحيطية تحتها.

ولقد تبين من الدراسات المكثفة التي قام بها العالم الأمريكي بينوف Benioff حول توزيع البؤر الزلزالية، أن الزلازل تحدث في نطاق ينحدر بدءاً من الخندق المحيطي وباتجاه القارة بزاوية قدرها (٤٥) درجة. وقد عرف هذا النطاق باسم نطاق بينوف، حيث تزداد أعماق البؤر مع زيادة المسافة من الخندق (شكل ٩-١٣، ص ٢٠). أي أن معظم الزلازل الضحلة تكون قريبة من الخنادق المحيطية، وتقع الزلازل المتوسطة والعميقة بعيدة عنها ولقد أوضحت المعلومات الزلزالية أن الزلازل ذات البؤر الضحلة قد وصلت إلى (٨,٦) على مقياس ريختر، بينما كانت شدة الزلازل المتوسطة تحت (٧,٥). أما الزلازل ذات البؤر العميقة فلم تتجاوز (٦,٩) في مقاديرها.

أما الزلازل في الساحل الغربي لأمريكا الشمالية وبخاصة في ولاية كاليفورنيا، فإنها تحدث نتيجة انزلاق صفيحة المحيط الهادي بمحاذاة صفيحة أمريكا الشمالية على طول فائق سان اندرياس (شكل ٩-١٤). حيث يتراكم الضغط على جانبي الفائق ويتم تحرير هذا الضغط في شكل زلزالي، كالزلازل الذي دمر مدينة سان فرانسيسكو عام ١٩٠٦.





شكل ١١-٩: لاق سان فرانسيسكو

٢- حزام البحر المتوسط و عبر آسيا Mediterranean and Trans- Asiatic belt: يتبع هذا الحزام السلاسل الجبلية حديثة التكوين. ويمتد على طول أقواس جبال الألب لأوروبا وشمال أفريقيا عبر آسيا الصغرى (تركيا) والقوقاز وإيران والباكستان إلى بامير Pamir وهيمالايا والتبت والصين. يتميز هذا النطاق بأن أغلب الزلازل الكبيرة التي تحدث فيه ذات بؤر ضحلة ومتوسطة. وقد كان يعتقد أن هذا الحزام خالٍ من الزلازل ذات البؤر العميقة. ولكن الزلزال الذي حدث في عام ١٩٥٤

كانت بورتو على عمق (٦٣٠) كيلومتراً تحت جنوب منحدرات جبال سيرانيفادا في اسبانيا. قد غير رأي العلماء الذين كانوا يعتقدون أن هذه السلاسل ناجمة من اصطدام الصفائح القارية. وبدأت الأبحاث للتحري فيما إذا كان يوجد فيها خنادق محيطية قديمة.

٣- حزام نظام مرتفعات وسط المحيطات: يتوافق هذا الحزام مع مرتفعات وسط المحيطات. ونظراً لقرب مرتفع وسط المحيط الأطلسي من القارتين الأوربية والأمريكية فقد نال اهتماماً كبيراً من قبل الباحثين. حيث يتراوح ارتفاع أعالي السلاسل الجبلية المولفة له ما بين ٢٥٠٠ إلى ٣٠٠٠ متر فوق سطح قاع المحيط. وقد تبرز في بعض الأماكن فوق مستوى سطح البحر كما هو الحال في جزيرة ايسلندا. وتتألف مرتفعات وسط المحيطات من طبقات من صخور البازلت المتصدعة والمدفوعة إلى أعلى. وتتميز هذه المرتفعات بواد عميق عند محوره تخرج منه اللابات البازلتية الجديدة، التي تضاف باستمرار وبالتساوي تقريباً لكلتا الصفيحتين المحيطيتين المتباعدتين.

تحدث الزلازل على طول أعراف وسط المحيطات وعلى امتداد فوالق التحويل transform faults التي تقطعها (شكل ١١-٣١) وتكون الزلازل في هذا الحزام خفيفة وتمثل نسبة قليلة من الزلازل التي تحدث في العالم.

### تأثيرات الزلازل:

يهتم معظم الناس بالهزات الأرضية بسبب تأثيراتها على القشرة الأرضية والكائنات البشرية وعلى أعمال البناء والتشييد. ومن بين كل الهزات التي تحدث سنوياً وتثير الاهتمام واحدة أو اثنتان، حيث تحدث فيها انزلاقات أرضية وانخفاض الكتل الأرضية أو ارتفاعها. ونحو المائة منها تكون قوية قرب مراكزها إلى حد يكفي لتدمير الحياة الإنسانية وملحقاتها. لكن الهزات الباقية تكون ضعيفة جداً لا تترك تأثيرات خطيرة.

النار: تكون النار التي يسببها الزلزال أكبر خطراً من الزلزال نفسه. ويكون

مصدرها تهدم المواقد وانقطاع الأسلاك الكهربائية أو انقلاب المصابيح. وقد يكون سبب اشتعال النيران المواد الكيميائية، كالزلازل الذي حصل في مدينة طوكيو عام ١٩٣٢. حيث دمرت النار ما يقرب من ٩٥٪ من الخسارة الاجمالية لهذا الزلزال. فبعد مضي ثلاثين دقيقة من بداية حدوثه كانت النار قد اشتعلت في (٣٥٢) مكاناً من طوكيو. وجاءت رياح بسرعة كبيرة في اتجاهات مختلفة، أدت إلى امتداد المنطقة المحترقة بشكل كبير. وخلال (٥٦) ساعة كانت نسبة ٧١٪ من منازل طوكيو قد احترقت و ٩٩٣٣٣ شخصاً توفوا و ١,٣٧٣٣ شخصاً تشوهوا بالحروق.

تدمير المباني والمنشآت: تسبب الزلازل دماراً كبيراً في المنشآت، وذلك لأن الموجات الزلزالية تؤدي إلى اهتزاز الأرض فتحركها أفقياً وشاقولياً بطريقة معقدة. ففي زلزال آلاسكا عام ١٩٦٤، لحق ضرر كبير بالمباني، بالرغم من أنه روعي في بنائها مواصفات المباني المقاومة للزلازل. وذلك يعود إلى الفترة الزمنية التي استغرقها الزلزال، والتي قدرت بنحو (٣-٤) دقائق، مع أن معظم الزلازل لها اهتزازات تدوم من ٢٠ ثانية إلى دقيقة واحدة.

قد تسبب الزلازل اختلال النظام المالي في المنطقة. فمثلاً كسر وصدع نحو (٢٣٠٠٠) انبوب مائي في سان فرانسيسكو بسبب الزلزال الذي حدث عام ١٩٠٦ واندفع منها تيار مائي ملأ بضغطه العالي جوانب المدينة والمنازل. ومنذ ذلك الوقت اتخذت التدابير الاحتياطية. حيث وضعت صمامات لتعزل المنطقة المتأثرة وتحتفظ بضغط الماء العالي في أنحاء المدينة كافة.

إن المباني الحديدية التصميم والمسلحة بالحديد تقاوم فعل الزلازل العنيفة. ولقد دمر الزلزال الذي ضرب مدينة طوكيو عام ١٩٢٣ المباني القديمة من حول بنك ميتسوبيتشي وبقي البنك سالمًا. ولم تستطع الموجات الاهتزازية لزلزال عام ١٩٥٧ من تدمير البرج في مدينة مكسيكو في أمريكا اللاتينية، بينما تأثرت المباني المحاورة له. أما الأنفاق الأرضية والمنشآت المبنية تحت الأرض فهي قليلة التأثر بأعنف الهزات الزلزالية.

إن شدة تأثير البناء بالموجات الاهتزازية يعتمد جزئياً على طبيعة الأرض التي

أسست عليها المباني. ففي الزلزال الذي اجتاحت مدينة سان فرانسيسكو عام ١٩٠٦ عانت المدينة (١٢) ضعفاً مما عانتها المباني المحاورة، وذلك لأن أساس المدينة تربة رملية حصوية غضارية مشبعة بالمياه، لأن هذه التربة غير متماسكة وتعمل على تضخيم الاهتزازات إلى درجة أكبر من الطبقات الصخرية المتماسكة.

**التغيرات في مستوى سطح البحر:** تحدث الزلازل تغيرات في مستوى سطح البحر، يمكن ملاحظتها من الثقوب التي تتكون في بعض الصخور الشاطئية بفعل بعض الحيوانات البحرية فمثلاً شوهد آثار حيوان بحري عرف باسم ليتوفاجا *Lithophaga* بمحاذاة الشاطئ القريب من طوكيو في اليابان. يمش هذا الحيوان داخل زوج من الأصداف. ويحفر بيته في الشاطئ الصخري بمستوى سطح البحر. ولقد شوهدت في مكان ما من الشاطئ حفر مهجورة وأنفاق حفرتها هذه الحيوانات في أربعة مستويات مختلفة فوق مستوى سطح البحر. وقد دلت السجلات التاريخية على أن كل نهوض اعزى سطح الأرض كان بسبب هزة أرضية ضربته. ففي خلال الأعوام ٣٣، ٨١٨ و ١٧٠٣ و ١٩٢٣ بلغ مجموع النهوض نحو (١١) مرة في مدى (١٨٠٩) أعوام. ويبدو أن هذا التغير ليس كبيراً، ولكنه إذا استمر بالمعدل نفسه لمدة (٢٠٠,٠٠٠) عام أخرى، فإن النهوض سيبلغ نحو الكيلومتر. وتعد هذه الحركة بالنسبة للعبور الجيولوجية حركة سريعة.

**الانزلاقات الأرضية:** يرافق عادة حدوث الزلازل في المناطق التي تكثر فيها المنحدرات الشديدة انزلاقات أرضية. وتحدث هذه الانزلاقات في منطقة نادرًا ما يزيد نصف قطرها (٣٥ - ٥٠) كيلومتراً عن مركز الهزة السطحي. ففي مقاطعة كانسو *Kansu* في الصين وفي توضعات اللوس ضربت المنطقة هزة أرضية عام ١٩٢٠ وسببت أكثر مظاهر الانزلاقات الأرضية وضوحاً، ودفع ضريتها نحو (١٠٠,٠٠٠) مواطن.

**الصوت:** عند حدوث زلزال في منطقة ما، فإن اهتزازات الأرض تؤثر في الغلاف الجوي المحيط بها. وتحدث أمواجاً صوتية في مدى سمع الإنسان. وتعرف هذه الأصوات بأصوات الهزة الأرضية. وقد وصفت هذه الأصوات بأشكال مختلفة.

وتكون عادة كائين منخفض وأصوات انفجارات. وتسمع عادة في مكان قريب جداً من مركز الهزة أصوات حادة شبيهة غالباً بسقوط صخرة هائلة. وتشبه الأصوات الأبعد من ذلك بعربات ثقيلة تمر مسرعة على أرض صلبة. أو بصوت قصف الرعد أو صوت قصف مدفعية ثقيلة تقصف من مسافة بعيدة. وبالطبع فإن صوت الهزة الأرضية مميز تماماً بسبب تهدم وهدير المباني المهتزة.

### النتنبؤ بالزلازل:

تأتي اليابان في طليعة الدول المهتمة بإمكان التنبؤ بحدوث الزلازل نظراً لموقعها الجغرافي ضمن حزام زلزالي نشط. فقد أقاموا شبكة معقدة من أجهزة الرصد الزلزالي تمتد داخل المحيط الهادي قرابة (٢٠٠) كيلومتر. ففي قاع المحيط تقل نسبة التشويش الاهتزازي إلى الحدود الدنيا، لذلك يمكن لأجهزتها أن تسجل بدقة مختلف الحركات الأرضية، بما فيها الانحناءات الصخرية والحركات الفالقية ومختلف الاهتزازات الزلزالية الناجمة منها، وأهمها موجات مقدمة الصدمة التي تسبق حدوث زلزال كبير. وقد اقيمت شبكات الرصد الزلزالي في بعض مناطق الولايات المتحدة التي تتسم بالاهتزازات الزلزالية. وتقام في معظم أنحاء العالم شبكات مماثلة.

وعلى الرغم من عدم توافر وسائل علمية دقيقة يعتمد عليها بالتنبؤ قبل وقوعها ولو بقليل، فقد أمكن التنبؤ بحدوث زلزال طشقند في الاتحاد السوفيتي عام ١٩٦٦ عن طريق تتبع نسبة غاز الرادون في الآبار - فالرادون هو غاز حامل ينشأ من التفكك الإشعاعي للراديوم، ويمكن أن يوجد بنسب قليلة في بعض أنواع الصخور وعادة يكون هذا الغاز محتبساً داخل الصخور إلا أنه يتحرر منها بنتيجة تراكم الاجهاد على هذه الصخور وحدث تشققات جديدة فيها.

وفي شباط ١٩٧٥ أمكن التنبؤ بحدوث زلزال كبير في شمال شرق الصين قبل ساعات قليلة. وبنتيجة التحذير والتقييد بالتعليمات أمكن إخلاء البيوت والمنشآت من عدد يقرب من ثلاثة ملايين نسمة، أمضوا جميعهم أمسية شديدة البرودة في مناطق صحراوية، وأمكن انقاذ عشرات الآلاف من الأرواح. وقد أكدت التقارير التي وردت بعد حدوث هذا الزلزال على أن أضراراً فادحة لحقت نحو ٩٠٪ من

أبنية مدينة هاي شنغ Haicheng. فقد ساعد رصد موجات مقدمة الصدمة التي سبقت هذا الزلزال على هذا التنبؤ.

ولسوء الحظ استطاع الصينيون التنبؤ بحدوث زلازل قوي في منطقة تانغ شان Tang Shan عام ١٩٧٦ إلا أنهم لم يتمكنوا من تحديد تاريخ دقيق لحدوث الزلزال. فقد حدث هذا الزلزال وأدى إلى قتل ما يقرب من ٦٥٠,٠٠٠ نسمة وجرح نحو ٧٨٠,٠٠٠. فقد كان التحذير من وقوع هذا الزلزال طويل الأمد وغير دقيق الموعد. ونضيف إلى ذلك امكان صدور تحذيرات خاطئة، فقد صدر تحذير خاطئ في الصين في إقليم مجاور هونغ كونغ أجلى من جرائه السكان من منازلهم لمدة شهر تقريباً ولم يحدث الزلزال. وعلى ذلك يجب أن يكون البحث والتحري عن حدوث الزلازل دقيقاً جداً حتى يُتخذ القرار بإخلاء المساكن. فإخلاء السكان في مدن مكتظة مثل لوس أنجلوس سوف ينجم عنه خسائر مادية فادحة تشمل ضياع الوقت وتكاليف إخلاء المساكن والمنشآت إضافة إلى الحوادث التي يمكن أن يسببها الهلع. لذلك يجب أن يكون التنبؤ بحدوث الزلازل مبنياً على أساليب علمية دقيقة وموثوقة جداً.

أما التحكم بحدوث الزلازل فهو أمر آخر. فقد تبين لعلماء الزلازل امكانيات تخفيض حدوث الزلازل بوسائل اصطناعية وهذا ما شجع العلماء على متابعة هذا المجال. ففي الفترة الواقعة بين عامي ١٩٦٢ - ١٩٦٦ أجريت دراسات رصد زلزالي في منطقة ارسنال Arsenal في جبال روكي الأمريكية، وهي منطقة هادئة لم تشهد أحداثاً زلزالية منذ نحو (٨٠) سنة قبل عام ١٩٦٢. ومنذ هذا التاريخ بدأت المنشأة الكيميائية المقامة في أرسنال بضخ النفايات الكيميائية في الأرض داخل آبار عميقة تزيد على ٣٦٠٠ متر.

وقد سجل الرصد الزلزالي الذي أجري بين نيسان ١٩٦٢ وأيلول عام ١٩٦٥ حدوث نحو (٧٠٠) زلزال صغير منها ٧٥ زلزالاً شعر به الإنسان. فقد أدى حقن مياه النفايات في أعماق الأرض إلى تسهيل تحرك الكتل الصخرية على امتداد الشقوق والفوالق، والتي كان الاجهاد يراكم فيها على مدى سنين طويلة. وعندما

أوقف ضيغ هذه النفايات لمدة سنة لوحظ تناقص واضح في النشاط الزلزالي، ثم عاد بعد استئناف الضيغ. ولقد وقعت أيضاً أحداث زلزالية سببها نشاط الإنسان في مناطق مجاورة لبحيرات السدود. فقد حدثت مئات الزلازل في المناطق الواقعة بين ولايتي أريزونا ونيفادا إثر ملء بحيرة سد ميد Mead. حيث أدى ملؤها إلى زيادة الوزن على الصخور المبنية فوقها، وقد زاد في تنشيطها تغلغل مياه البحيرة عميقاً داخل الأرض. وكذلك أدى تخزين الماء في بحيرة كبيرة خلف سد رئيسي في الهند إلى تحريض حدوث زلزال مدمر أدى إلى قتل ما يقرب من ٢٠٠ نسمة.

يمكن أن يضاف إلى تأثير بحيرات السدود في تحريض الزلازل التفجيرات النووية القوية التي تقوم بها بعض الدول الكبرى تحت الأرض. إلا أن هذه التفجيرات على الرغم من طاقتها الهائلة لم تؤدي إلا لحدوث زلازل صغيرة لا تتناسب مع قوة هذه التفجيرات. ويبقى الأمل في إمكان توصيل العلماء في المستقبل إلى التقليل من أخطار الزلازل المدمرة، عن طريق تحريض حدوث زلازل خفيفة، إما بضخ الماء في باطن الأرض، أو عن طريق التفجيرات النووية، بحيث يتم تحرير أجزاء من الطاقة المختزنة في الصخور المجهدة. وهنا لا بد من التذكير أن الزلزال الكبير يتطلب تحريض ألوفاً من الزلازل الصغيرة حتى يُفرغ جزءاً من طاقته. ويتطلب هذا المجال إجراء الكثير من الاختبارات الدقيقة في مناطق نائية، قبل الدخول في مخاطر يتم تطبيقها على الفوالق الكبرى مثل فالق سان اندرياس المار من مناطق مكثفة بالسكان.

### فوائد الزلازل:

مع أن حدوث الهزات الأرضية (أو الزلازل) ينتج عنه أضرار كبيرة في بعض الأحيان، إلا أن أحداث وقوع الزلازل نفسها تعد وسائل فعالة تساعد العلماء على دراسة باطن الأرض. فمن الممكن أن تصل الملاحظات العلمية حول باطن الأرض إلى أعماق محدودة جداً، عن طريق الحفر البشري الآلي، لا تزيد بأية حال على (١٥) كيلومتراً تحت السطح. وبذلك لا توجد وسيلة مباشرة لمعرفة أعماق القشرة الأرضية أو المعطف الواقع تحتها أو نواة الأرض. ولأجل استكشاف هذه الأجزاء العميقة في باطن الأرض، يلجأ العلماء إلى وسائل غير مباشرة أهمها: طبيعة الأمواج

الاهتزازية المختلفة الناجمة من الزلازل وانتقالها في باطن الأرض عبر مختلف أجزائها. فبواسطة رصد هذه الأمواج في أماكن مختلفة من أنحاء العالم وإجراء قياسات دقيقة تُحدد أنواعها وسرعة انتقالها تمكن العلماء من رسم صور عملاقة لباطن الأرض تشبه صور باطن الإنسان بتقانات الأشعة السينية.



# الفصل العاشر

## البراكين

لقد أتت تسمية البراكين Volcanoes من فولكين Vulcain (إله النار) عند الرومان، فقد كانوا يعتقدون أن البراكين مداعن مصانع الحديد لاله النار. وقد شيدوا الهياكل لعبادة الآلهة في مظاهر أسوار المدن، ومنذ ذلك الحين أطلقوا على الجبال التي تنفث اللهب والدخان، وقطع الصخور واللاها اسم البراكين.

تمثل ظاهرة النشاط البركاني نوعاً من أنواع الحركات الفجائية والباطنية التي تصيب القشرة الأرضية. وتكون بعض القشرة الأرضية مقراً لحادثات تكوينية ترافقها حادثات بركانية حيث يتشقق سطح الأرض وينكسر وتخرج منه الغازات والأبخرة واللاهاب إلى السطح مشكلة البراكين.

### طبيعة النشاط البركاني Nature of volcanic activity

ينظر عادة إلى النشاط البركاني على أنه عملية تنتج أشكالاً مخروطية جميلة، تُبنى من تراكم مواد مختلفة بثورانات شديدة من آن لآخر. ولكن في الحقيقة يشمل النشاط البركاني انفجاعات بركانية تحدث بطرائق متباينة وتؤدي إلى تشكل تضاريس بركانية بأشكال مختلفة، وذلك حسب طبيعة اللاها المتدفعة وكمية

الغازات المرافقة ودرجة الحرارة.

## الحاصلات البركانية

### أ - الحاصلات البركانية الغازية

تحتوي المغما على كميات مختلفة من الغازات والأبخرة المنحلة، وهي تبقى محبوسة ما دامت تحت تأثير الضغط الحابس. وتبدأ هذه الغازات والأبخرة بالتححر عند انخفاض الضغط المسيطر على المغما، فتندفع بقوة كبيرة إلى السطح. ولهذا السبب يكون تحديد كميتها وتركيبها من الأمور الصعبة.

يعتقد العلماء، اعتماداً على المعلومات المستمدة من النشاط البركاني بحجز هاواي، بأن بخار الماء وغاز ثنائي أكسيد الكربون ( $CO_2$ ) يشكلان نحو ٩٠٪ من مجمل الغازات المنطلقة. وأن مركبات النيتروجين تشكل نحو ٥٪، ومركبات الكبريت مع كميات أقل من الكلور والفلور والبور والأرغون بالإضافة إلى أنواع أخرى كثيرة تشكل نحو ٥٪.

إن معرفة التركيب الكيميائي للغازات المندفعة تشكل أهمية كبيرة، حيث أن الطبقات المولفة للغلاف الجوي قد تكون تكونت من هذه الغازات. وبالرغم من نسبتها الضئيلة التي تتراوح ما بين (١-٥) بالمائة من الحجم الكلي للغاز المندفعة، فقد تبلغ كميات هائلة. فقد بلغت كمية الأبخرة والغازات المنطلقة في الهواء في بعض الانفجاعات البركانية في الأسكا نحو (٢٣) مليون ليتر في الثانية، وبدرجة حرارة نحو (٦٠٠) درجة مئوية. ويمكن استخدام الأبخرة والغازات الأخرى ذات المنشأ البركاني كمنبع مهم للطاقة الكهربائية، وكذلك في بعض الصناعات الكيميائية.

بالإضافة إلى كون الغازات تشكل عاملاً مهماً في دفع المغما إلى فوهات البراكين، فإنه يعتقد أنها تساهم في تشكيل ممرات تصل حجرة المغما بسطح الأرض. ففي بداية الأمر، تؤدي الحرارة العالية للمغما إلى تصدع الصخور التي فوقها، مما يؤدي إلى اندفاع تيارات غازية حارة وذات ضغط مرتفع تقوم بتوسيع الصدوع وتطور إلى ممرات تصل إلى السطح. وبعد إتمام هذه العملية تأتي الغازات

المسلحة بقطع صخرية تحت جدران الممرات وإزالة كل ما يعترضها في طريقها من نشوءات وتكوّن ممرات واسعة ذات مقطع دائري تعرف بالأنابيب البركانية volcanic pipes أو المداعن البركانية. وعندما تنفّج المغما إلى الأعلى وتؤدي إلى التلغقات البركانية أو الانفجارات البركانية.

#### ب - الحاصلات البركانية السائلة

تعدّ اللافا lava أو اللابا من أهم المنتجات السائلة للهيئات البركانية. فهي صهارة سيليكاتية سائلة ذات درجة حرارة تزيد على (١٠٠٠° مئوية)، تشبه في جميع خواصها المغما الموجودة في باطن الأرض، وتختلف عنها باحتوائها على كميات قليلة من الغازات والأبخرة التي تشبع بها المغمات في الأعماق السحيقة. وتخرج اللابا من فوهة البركان وشقوقه وتسيل إلى مسافات تختلف باختلاف تركيبها، وتصنف بالنسبة إلى كمية السيليكا ( $\text{SiO}_2$ ) فيها إلى:

١- اللابا الحامضية Acidic lava: تتراوح نسبة السيليكا في اللابا الحامضية من ٦٥ - ٧٥٪، ويتصف هذا النوع بأنه قليل اللزوجة، يتصلب بسرعة معطياً الصخور المعترجة الحامضية. يرافق اندفاع هذا النوع من اللابا غازات وكميات كبيرة من بخار الماء، مما يؤدي إلى خروجها بقوة انفجارية كبيرة تتطاير منها قطع صغيرة وكبيرة، وهي تتصلب وتتراكم حول فوهة البركان مختلطة مع اللابا. وتأخذ عادة اللابا الحامضية شكل سيل قصير يشبه اللسان يمتد على جوانب البركان مشكلة غروراً بركانياً شديد الانحدار. تشكل اللابات الحامضية اللزجة صبات ضعيفة الانتشار ذات سطوح ممزقة.

٢- اللابا الأساسية أو القاعدية: تكون نسبة السيليكا فيها دون ٦٥٪ وتتميز بدرجة حرارتها التي تزيد على ١٢٠٠° مئوية وبحركتها الكبيرة عند خروجها إلى سطح الأرض وجريانها لمسافات بعيدة مكونة سيولاً نارية.

تتصلب اللابا مباشرة بعد خروجها إلى سطح الأرض مشكلة قشرة سطحية، لكن جزءاً منها تحت هذه القشرة يبقى سائلاً لمدة طويلة. ثم لا تلبث أن تنطلق

الغازات المحتبسة على شكل انفجارات تؤدي إلى تكسر القشرة السطحية المنصلبة مشكلة كلاً لائبة مزاجية فوق بعضها بعضاً تدعى اللابات الكلية.

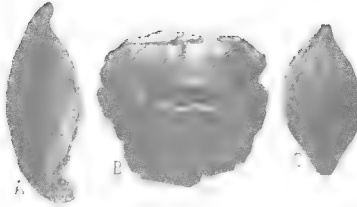
#### جـ - الحاصلات البركانية الصلبة

تندفع كميات كبيرة من المنتجات الصلبة خلال فترة الهيجان البركاني نتيجة الضغط الكبير للغازات، وتحدث الانفجارات البركانية المتعددة. وتكالف هذه المنتجات من قطع صخرية آتية إما من تصلب اللابا المقلوبة في الهواء أو من تجزؤ السدادة التي كانت تغلق المدخنة، وأحياناً من جدران المدخنة نفسها. وقد تكون هذه القطع الصلبة عبارة عن صخور أعماق حُفرت مع اندفاع اللابا. وتُميز حسب حجم هذه القطع: الرماد، والخبث، والقنابل البركانية. وتسهم هذه الحاصلات في بناء المخروط البركاني. وقد تحمل الرياح الرماد البركاني إلى مسافات بعيدة محدثة أضراراً كبيرة للنباتات.

تتراوح مقاييس القنابل البركانية من ٥ - ١٠ سم وقد تصل أحياناً إلى عدة أمتار. ولها شكل مغزلي نتيجة الحركة اللولبية التي تأخذها اللابا بتأثير قوى الدفع الكبيرة، وقد تكون على شكل قشور (شكل ١٠-١). أما إذا كانت القطع أصغر من السابقة سميت اللابيات Lapilli وتبلغ مقاييسها من ١-٣ سم. وإذا كانت القطع صغيرة جداً سميت الخبث البركاني والدقيقة منها تعرف بالرماد البركاني. وعندما تتوضع هذه المنتجات الصلبة على الأرض بعد قذفها عالياً في الهواء فإنها تجرف بحياه السيول وتعطي نوعين من الرواسب النارية:

١- رواسب نارية خشنة تشمل: الرصيص البركاني volcanic agglomerate، والبريش البركاني volcanic breccia، وتتميز الأولى بكون القطع الصخرية فيها مستديرة بينما في الثانية تكون زاوية.

٢- رواسب نارية دقيقة تشمل أنواع الخبث والرماد البركاني، الذي يكون عند توضع على سطح الأرض الطف البركاني volcanic tuffa.



شكل ١٠١: يوضح أشكال القنابل البركانية

## أنواع البراكين

تصنف البراكين عادة حسب طريقة الاندفاع في نوعين رئيسين هما البراكين الانفجارية والبراكين الهادئة. فالاندفاعات البركانية الانفجارية تنجم من تحرر فجائي لضغوط هائلة متراكمة تزيد في وطأتها عمليات التحرر السريع للأبخرة والغازات، مما يؤدي إلى إنطلاق كميات هائلة من الفتات الناري *pyroclasts* انطلاقاً انفجارياً عذفاً. أما الاندفاعات البركانية الهادئة فتتمثل بتدفقات للمغيمات المتحررة من الفوهات البركانية لتسيل على المنحدرات متجهة للأماكن المنخفضة. وفي كثير من الحالات تتغير الاندفاعات البركانية من انفجارية إلى هادئة أو العكس.

يلعب محتوى المغيمات من السيليكا دوراً مهماً في تحديد نوع النشاط البركاني، فيما إذا كان هادئاً أو انفجارياً. فكلما كانت نسبة السيليكا أعلى ازدادت لزوجة المغما، وإن المغما اللزجة تسد فوهات البراكين حين تتصلب ويخمد البركان، الأمر المودي إلى تراكم الضغوط الواقعة تحتها بشكل تدريجي حتى تصل قوتها إلى درجة تقتحم فيها السدادة ويحدث الانفجار البركاني. وتترافق الانفجارات البركانية عادة مع تدفق اللابات الأنديزيتية والريوليتية، لأن الانطلاق السريع للغازات المتحررة من هذه اللابات قد تؤدي إلى زيادة لزوجتها. أما الاندفاعات البركانية الهادئة فتترافق

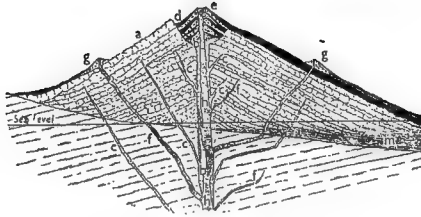
عادة مع اللابات البازلتية التي تتميز بلزوجة أقل وسيولة أكثر بسبب محتواها المنخفض من السيليكا.

إن التركيب الكيميائي الوسطي للقارات يتراوح إلى حد ما بين التركيب الريوليئي والتركيب الأنديزيتي، وإن التركيب الكيميائي الوسطي لقشرة المحيطات هو تركيب بازليتي، ولهذا فإن البركة على اليابسة تميل لأن تكون انفجارية. بينما تميل البركة في المحيطات إلى التنفق الهادئ.

### البراكين والاندفاع البركاني

يعني الاندفاع البركاني volcanic eruption المتتابع تراكمًا جليئًا من المواد المقذوفة تتخذ غالباً شكلاً مخروطياً. وهو الشكل المألوف الذي يتبادر إلى الذهن عند ذكر البراكين. يقع فوق قمة المخروط فوهة crater، قد تكون في بعض البراكين على شكل تجويف عميق، ذي جدران شديدة الانحدار يتراوح قطره من بضعة أمتار إلى بضعة كيلومترات. ويتصل تجويف الفوهة بمدخنة يمر منها المنتجات البركانية إلى سطح الأرض. وقد تتصل المدخنة الرئيسة في بعض البراكين بمداخن ثانوية تخرج منها اللابات إلى سطح الأرض أثناء ثوران البركان، وتشكل مخاريط بركانية مجحوم صغيرة تتوضع على الجوانب المنحدرة للمخروط الرئيس. ويعرف هذا النموذج بالبراكين ذات المدخن المركزية (شكل ١٠-٢).

ونظراً لاختلاف الظروف المؤدية إلى تشكل البراكين فإنها تأخذ أشكالاً وحجوماً مختلفة. وقد جمع الجيولوجيون البراكين المتشابهة في طريقة اندفاعها وأشكال مخاريطها في مجموعات ثلاث وهي البراكين الدرعية shield volcanoes والبراكين المركبة composite volcanoes وبراكين الرماد cinder volcanoes.



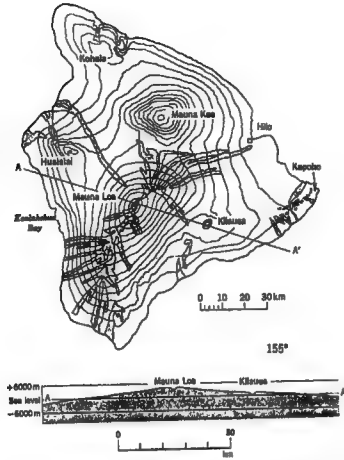
شكل ١٠-٧: مقطع تخطيطي في نموذج بركاني مركزي.

يوضح المدخنة المركزية h والمدخن الثانوية c, f. كما يوضح المخروط البركاني B ومخاريط u كناية بحجوم صغيرة g.

## ١- البراكين الدرعية

وهي هياكل بركانية تتشكل من تتابع تدفقات من اللابات البازلتية شديدة السيولة، تأخذ شكل قباب منخفضة واسعة. حيث تخرج اللابات من فوهة مركزية أو من شقوق بركانية، وتتدفق على شكل سيل ناري بسرعة تبلغ نحو (٤-٥) م/ثا وقد تصل إلى نحو ٨ م/ثا في أسفل المنحدرات. تنطلق الغازات في هذا النوع بسهولة دون أن تحدث انفجارات قوية ولا ترافقها مقدوفات صلبة.

تأخذ البراكين الدرعية أشكالاً دائرية مقببة حين ينظر إليها من الأعلى، حيث ترتفع جوانبها تدريجياً نحو الفوهة، ونادراً ما يتجاوز انحدارها (١٠°) درجات. ومثال ذلك البراكين الدرعية في جزيرة هاواي. فقد بنيت هذه الجزيرة من تلاحم خمسة براكين درعية (شكل ١٠-٣).



شكل ٣.١٠: خريطة لجزيرة هاواي.

ب - مقطع عرضي لمي بركاني كيلوا ومونالوا حسب الاستقامة A-A'.

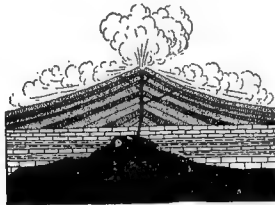
إن أكثر اللابات حداثة هي تدفقات بركاني كيلوا Kilauea ومونالوا Mouna Loa. فقد شهد بركان كيلوا عدة نشاطات حدثت خلال بضعة من العقود الماضية، كما اندفعت اللابات من بركان مونالوا عام ١٩٥٠ مغطية عدداً من القرى، ويقدر حجم هذه اللابات بنحو (٤٩٠) مليون متر مكعب. وبعد هدوء استمر حتى عام ١٩٧٥. عاد هذا البركان إلى النشاط وتدفق ما يقرب من (٣٠) مليون متر مكعب من اللابات. ويرتفع بركان مونالوا عن سطح البحر (٤٢٠٠) متراً. فإذا أضيف هذا الارتفاع إلى ارتفاع جزئه المغمور تحت سطح البحر فإنه يبلغ نحو (٩٠٠٠) متراً. ويشكل أعلى جبل في العالم. ويبلغ طول له



(١١٩) كيلومتراً وعرضه (٨٥) كيلومتراً عند قاعدته على قاع المحيط الهادي. أما حجمه فيقدر بنحو ٥٠,٠٠٠ كيلومتر مكعب.

## ٢- البراكين المركبة

وهي براكين ذات مخاريط مؤلفة من تعاقب مواد فتاتية نارية *pyroclastic* وصبات من اللابا مبنية حول الفوهة الرئيسة، ويكون انحدار جوانبها نحو ٣٠° في القمة تنخفض إلى حدود خمس درجات في القاعدة. ومثال هذا النوع بركان مايون Luzon في الفيليبين، وبركان (فولكان) في جزر ليباري شمال صقلية. ويكون لهذا النوع من البراكين نشاط مختلط من مقلوفات سائلة وصلبة



شكل ١٠-٤: رسم تخطيطي يوضح البراكين المظيفة.

وغازية. وتسبب اللزوجة العالية لللابات المندفعة تصلبها أثناء تدفقها البطيء على جوانب البركان، وقد يمتد تصلب المغما إلى الفوهة ويؤدي إلى اغلاقها وعندها يهدأ البركان، وحين يعود النشاط البركاني وتحتبس المغما مع الغازات والأبخرة المتحررة منها، يزداد الضغط على السدادة إلى درجة تؤدي إلى ثوران انفجاري عنيف، يقذف بكيميات هائلة من الفتات الناري، الذي يهبط ويتراكم جزء كبير منه على جوانب البركان، ولا يلبث أن يُغطى بتدفق لابي جديد، وإن تكرر هذه العملية

من الانفجاعات تُبنى المخاريط البركانية الطبقيّة stratovolcanoes (شكل ١٠-٤).

### ٣- براكين الرماد

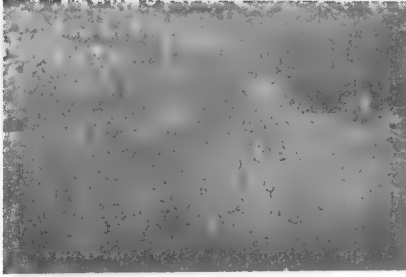
وهي ذات مخاريط مؤلفة من شظايا وفتات ناري يتراكم على جوانب الفوهة، والمحدارات جانبية تتراوح بين ٣٠-٤٥°، ترتفع قممتها لتصل إلى ما يقرب من ٥٠٠ م ومثال ذلك بركان باريكوتين Paricutin في المكسيك، وبركان سزومبولي في جزر ليباري في شمال شبه جزيرة صقلية. يتصف هذا النوع من البراكين بكون اللابا أساسية التركيب ومائعة بعض الشيء، ولكنها لا تسيّل أبداً. وعندما تصل اللابا إلى فوهة البركان تحدث انفجارات كبيرة، نتيجة تحرر الغازات المضغوطة، وتلقي رماداً وقنابل تسقط حول قمم البركان لتشكل منها مخروطاً بركانياً.

### ٤- نموذج بيلي Pelean type

يقع جبل بيلي في الجزء الشمالي لجزيرة المارتينيك التابعة لجزر الهند الغربية. وبمثل تدفق لابا لدرجة جداً لا تلبث أن تتصلب مشكلة سدادة تغلق فوهة البركان. ففي ١٩٠٢/٥/١ شوهدت فجأة سحابة سوداء ظهرت من قمة الجبل بعد أن انشقت شكل (٧)، وفي الثامن من الشهر نفسه حدثت انفجارات قوية مطلقة غازات وأبخرة عملة بالرماد والغبار ذات درجة حرارة تقارب (٨٠٠°) متفوية، ما لبثت أن غطت مدينة سانت بيير Saint Pierre لنقلها وقتلت جميع السكان، ويقرب عددهم من ٣٠,٠٠٠ نسمة. وقد رافق انطلاق الغازات ظهور ابرة انديزيتية ارتفعت عمودياً في الجو ووصلت إلى ارتفاع يقرب من ٣٠٠ م، وما لبثت مع مرور الزمن أن انهارت وتفتتت ولم يبق منها عام ١٩٠٧ إلا قطعة صغيرة، وقد عادت الانفجاعات في عامي ١٩٢٩ و ١٩٣٠.

وهنالك ظواهر أخرى شبيهة بالبراكين يطلق عليه بعض الجيولوجيين اسم البراكين الطينية mud volcanoes. وهي تتشكل من التدفقات الطينية التي تخرج من باطن الأرض مصحوبة بغازات كربونية أو هيدروكربونية. ويكثر وجودها في حقول البترول، ومثالها منطقة باكو على بحر قزوين في روسيا. ويعود تشكيلها إلى

الغازات المنطلقة من زيت البترول التي تدفع بقوة مع المياه الجوفية مواد طينية إلى سطح الأرض يؤدي تراكمها إلى تشكل مخروط طيني (شكل ١٠-٥).

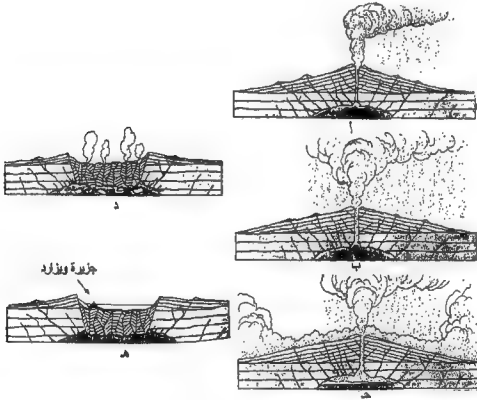


شكل ١٠-٥: البراكين الطينية

### الكلديرة caldera

وهي هيئة طبوغرافية تترافق مع البراكين، وتكون على شكل منخفض دائري تقريباً يتراوح قطره من (٨-١٠) كيلومترات. تشكل نتيجة هبوط قمة بركان ضخم كان موجوداً سابقاً، لذلك يجب أن نميز الكلديرات بشكل جيد عن الفوهات البركانية التي تظهر على شكل انخفاض دائري أو قمعي في قمة المخروط. أما أسباب نشوء الكلديرة فيمكن أن تكون ناجمة من الحث بعد حمود البركان أو هبوط أرضي يسببه نشاط انفجاري. وأكثر الأسباب المؤدية لتشكيلها هي انهيار قمة البركان بسبب تراكم أكذاس من اللابات وفراغ الحجرة المغماتية الواقعة تحتها من محتواها، بحيث ينعدم دعمها مما يؤدي إلى هبوط البركان هبوطاً ذاتياً نحو الأسفل مؤدياً إلى تشكل الكلديرة.

إن أشهر كلديرة معروفة في العالم وتحتذب السواح بشكلها الرائع هي كلديرة بحيرة كريت Crater في الأوريغون، التي يبلغ عرضها (٨-١٠) كيلومترات وعمقها (١٣٠٠) متر. وتقع في مكان يركان سمي فيما بعد بجبل مازاما Mount Mazama التي ترتفع قمته إلى نحو (٤٠٠٠) متر عن سطح البحر وقد بدأت هذه البحيرة بالتشكل منذ (٧٠٠٠) سنة خلال اندفاع شهده الهضود سنة (٤٠٠٠) ق.م. ويقدر الجيولوجيون حجم اللابات التي تدفقت منه خلال عدة مراحل ما يقرب من خمسين إلى سبعين كيلومتراً مكعباً من المواد البركانية. ونظراً لنقل هذه الكمية وافتقارها إلى الدعم من الأسفل فقد تداعى هذا البركان بعمليات هبوط بلغت نحو (١٥٠٠) متر، فوق حجرة مغماتية فارغة. وبعد تدهم المخروط ملأت مياه الأمطار الكلديرة المتكونة. وبعد فترة من الزمن تكون مخروط صغير من الرماد يسمى جزيرة ويزارد Wizard Island



شكل ١٠: يوضح مراحل تطور بحيرة كريت.

- أ- بداية الاندفاع البركاني
- ب- الاندفاع البركاني أصبح أكثر شدة مع تساقط الفتات القلبي، وخطو المنخلة البركانية من المغما.
- ج- ثورة الاندفاع البركاني وتفرغ الحجرة المغماتية.
- د- انهيار قمة مخروط البركان لنقل الحجرة المغماتية.
- هـ- بحيرة كريت اليوم. وتظهر جزيرة ويزارد واللابات مغمية قاع البحيرة وتكسب المغما المتبقية في الحجرة المغماتية.

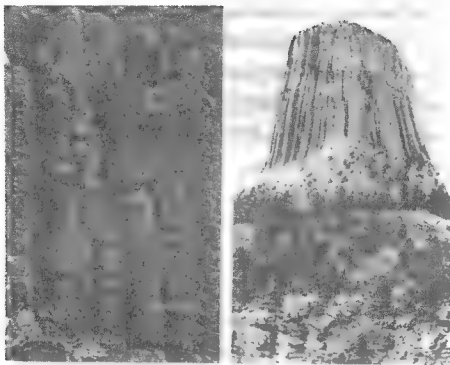
وتعد بحيرة كريتر أضخم كلديرة وجدت على سطح الأرض. إلا أن الملاحظات الكونية خارج نطاق الأرض سجلت وجود كلديرة ضخمة على بعض الكواكب. فقد سجلت المركبة الفضائية مارينر ٩ Mariner وجود كلديرة ضخمة جداً على سطح المريخ يبلغ قطرها (٦٥) كيلومتراً وتغطي مساحة تبلغ (٤٥) ضعف مساحة بحيرة كريتر.

### اندفاعات الشقوق Fissure eruptions

إن بعض الفتحات البركانية تكون شقوقاً طولانية في القشرة الأرضية تندفع منها اللابات وأحياناً الفتات الناري. أما اللابات التي تتدفق من هذه الفتحات فتكون عادة بازلية تندفع إلى السطح بهلواء دون حدوث انفجارات. وبسبب سيولتها العالية فإنها تنتشر إلى أماكن بعيدة عن مخرجها، وتنتج عادة حسب المخدار الأراضي إلى الأماكن المنخفضة وتملؤها. ويؤدي تتابع فترات نشاط التدفق اللابي إلى تشكل طبقات متعاقبة من البازلت تغطي مساحات واسعة وتسمى تشكيلات البازلت الناجمة منها البازلت الفيضي flood basalt أو البازلت السطحي plateau basalt.

إن أكبر تدفقات البازلت الفيضي حدثت في حزيران عام ١٧٩٣ في آيسلندا، التي تقع فوق مرتفع وسط المحيط، وهي التدفقات الوحيدة التي جرت على اليابسة وشهدتها التاريخ مع العلم أن عمليات تدفق البازلت الفيضي من الشقوق ما زالت تجري في أعراف المحيطات. فقد أدى وقوع سلسلة من الهزات الأرضية في آيسلندا إلى انفتاح شق في القشرة الأرضية بطول (٢٥) كيلومتراً أطلق عليه اسم شق لافي Laki fissure، أخذت تتدفق منه اللابات البازلتية في مراحل متقطعة، واستمرت حتى أوائل تشرين الثاني من العام نفسه. وقد انسابت اللابات في وادٍ نهري ملائمه بكامله وفاضت من جوانبه، كما اجتاحت الروافد النهرية وعدداً من القرى المجاورة، واستمر التدفق حتى وصلت اللابات إلى الأراضي الشاطئية المنخفضة، وانتشرت فيها على مساحات واسعة وأخذت شكلاً مروحياً كبيراً. وعند توقف تدفق اللابات البازلتية وتصلب البازلت بكامله حتى فوق الشق حدثت اضطرابات

انفجارية أدت إلى انطلاق الرماد البركاني من عدد من الفتحات على امتداد الشق في أكثر من (١٠٠) متراً. وقد بلغت المساحات التي غمرت بالبازلت الفيضي نحو (٥٦٥) كيلومتراً مربعاً. وقد شهد التاريخ الجيولوجي كثيراً من الأحداث المماثلة وكانت أضعف بكثير جداً مما حدث في آيسلندا. وعلى سبيل المثال نذكر البازلت الفيضي الذي غمر مساحات واسعة تشمل أجزاء من ولايات كولومبيا ونيفادا وكاليفورنيا وأريزون وواشنطن الأمريكية. وقد حدثت عمليات تدفق هذا البازلت منذ (١٠) ملايين سنة، وبلغت سماكته الإجمالية ما يقرب من (١٨٠٠) متر. ويتكشف معظمه في خنادق نهر السنيك Snake river وفي أسفل خنادق نهر كولومبيا. كما تظهر تكشفات هذا البازلت في كاليفورنيا الشمالية بشكل جيد وغودجي، حيث يظهر فيها كثير من هياكل البركة مثل أنفاق الالة java tunnels، حيث كانت يوماً ممرات الاله المتحركة، بُحمت من تصلب السطح الخارجي وبقاء الجزء الداخلي مملوءاً بالمواد المنصهرة التي تستمر في تقدمها داخل قنوات تاركة وراءها فراغات على شكل أنفاق. وتبدي طبقات البازلت السمكية هياكل أخرى مميزة أهمها البازلت العمداني columnar basalt، الناجم من عمليات التبرد والتقلص وحدوث فواصل تدعى الفواصل العمدانية columnar joints حيث يؤدي تبرد الالاهات وتصلبها إلى تقلص البازلت وتشكل شقوق عمودية على سطحها يزداد عمقها مع ازدياد التصلب، مما يؤدي إلى تشكل مضلعات موشورية بازلتية تشبه الأعمدة ويكون لها (٤-٦) من الأوجه الجانبية (شكل ١٠-٧). ويتكشف أيضاً بازلت عمداني يأخذ شكل البرج ويطلق عليه اسم برج الشياطين Devils tower ويفسر وجوده بهذا الشكل بتصلب الاله داخل مدخنة بركانية على شكل سدادة حيث تشققت بفواصل عمدانية.



شكل ٧-١٠: الفواصل المعدانية في البازلت وتمثل الصورة إلى اليمين برج الشياطين.

### داخات اليعموم Fumaroles

وهي فتحات سطحية تطلق مواد غازية فقط، يكثُر وجودها في بعض مناطق النشاط البركاني. ويدخل بخار الماء في تركيبها بنسب عالية جداً تزيد على ٩٠٪. وقد تصل إلى ٩٩٪ ويليهِ ثنائي اوكسيد الكربون ( $CO_2$ ). أما المواد الغازية الأخرى وهي بنسب قليلة جداً فتشمل سلفيد الهيدروجين ( $H_2S$ ) وحمض كلور الماء ( $HCl$ ) وحمض فلور الماء ( $HF$ ) والكبريت وثنائي اوكسيد الكبريت ( $SO_2$ ) والأمونياك ( $NH_3$ ) ومواد أخرى. ولا تتشابه المنطلقات الغازية (اليعموم) في نسب التركيب الإجمالي لمختلف المواد المذكورة. وهي تعود في أصلها إلى ما يتحرر من المغامات المحتبسة تحت سطح الأرض من أبخرة وغازات.

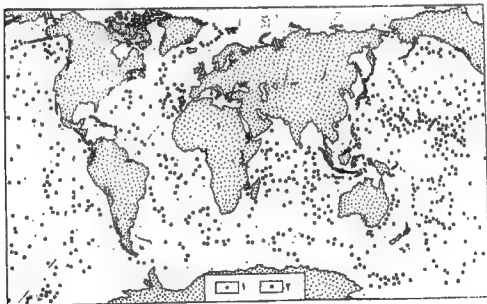
وقد تترسب حول فتحات الانطلاق تصعدات sublimates فلزية قد يتشكل

منها توضعات اقتصادية. وتوضع هذه المواد الفلزية من الحالة الغازية مباشرة دون المرور بالحالة السائلة. وكذلك تتفاعل الأبخرة والغازات مع الصخور التي تمر بتماس معها وتفسدها، وتحرر منها عناصر معدنية ولا معدنية وتوضع مركباتها مع ما يتوضع على سطح الأرض.

يمكن أن تحتوي توضعات اليحموم كميات مختلفة من المعادن المفيدة مثل النحاس والرصاص والزنك والمنغنيز والفضة وأحياناً الذهب، بالإضافة إلى بعض الكلوريدات والسلفات والفلوريدات والتيلوريدات والكبريت الحر. وبعض هذه التوضعات يمكن أن يصلح للاستثمار المتجمي.

### توزيع النشاط البركاني

تقع أكثر من (٦٠٠) من السراكين النشطة المعروفة في مجال هوامش صفائح الغلاف الصخري المتقاربة (شكل ٨-١٠) يضاف إلى ذلك نشاط بركاني واسع النطاق يحدث بعيداً عن الأنظار على امتداد مراكز التوسع في أنظمة أعراف المحيطات، وفي داخل الصفائح أيضاً.



شكل ٨-١٠: توزيع البراكين في العالم.  
١- براكين نافطة  
٢- براكين تحت مائية وخفدة.



## ١- بركنة مراكز التوسع Spreading centre volcanism

يشكل القسم الأعظم من الصخور البركانية على امتداد أنظمة أعراف المحيطات، حيث ينشط توسع قاع المحيطات. فعندما يندفع جزءان من الغلاف الصخري ليتباعدة عن بعضهما بعضاً، ينخفض الضغط عن الصخور الواقعة أسفل هذا الغلاف، مما يؤدي إلى خفض نقطة الانصهار لصخور المعطف بيريدوتيتية التركيب، ويحدث فيها الانصهار الجزئي الذي يولد كميات كبيرة من المagma البازلتية، التي تتحرك نحو الأعلى لتملأ الشقوق حديثة التشكل في الغلاف الصخري (شكل ١٠-٩، ص ٣٩٣).

تشكل بعض الصهارة البازلتية التي تصل إلى قاع المحيطات تدفقات لابة واسعة النطاق، أو أنها أحياناً تتكس على شكل تراكمت لابة، يمكن أن تُشكل محاريط بركانية قد ترتفع فوق سطح البحر مثل بركان سورتي Surtsey. الذي انبثق من المحيط إلى القرب من جنوب أيسلندا عام ١٩٦٣. يوجد أيضاً العديد من المحاريط البركانية التي تشكلت على امتداد قمم أنظمة أعراف المحيطات، وتحررت مبتعدة مع تشكل حديد من قشرة المحيطات بفعل توسع قيعان المحيطات المستمر.

## ٢- بركنة نطاقات الانغراز Subduction zone volcanism

ينحصر وجود الصخور النارية ذات التركيب الأنديزيتي والغرانيتي في سلاسل أقواس الجزر وفي القارات. ونسبة قليلة منها موجودة كجزء من براكين أحواض المحيطات العميقة. يضاف إلى ذلك أن معظم البراكين النشطة التي تندفع منها المagma الأنديزيتية تقع في مناطق قارية، أو في أقواس الجزر الواقعة بمحاذاة خنادق المحيطات العميقة. لكون خنادق المحيطات هي مواقع انحناء صفائح قشرة المحيطات وهبوطها منفرزة في المعطف العلوي (شكل ١٠-٩). وعندما تصل صفائح المحيطات الباردة إلى أعماق تقرب من (١٢٥) كيلومتراً<sup>(١)</sup>. يحصل الانصهار الجزئي في قشرة

---

(١) يعتقد العلماء أن الانصهار الجزئي يحصل في صفائح المحيطات المنفرزة في أعماق تقرب من ١٢٥ كيلومتر.

الحيطات بازلتية التركيب، مع ما يرافقها من رسوبات مبللة معطية مغما انديزيتية التركيب، وبعد انصهار كميات كافية من المغما، تطفو تدريجياً نحو الأعلى لأنها أقل كثافة من الصخور المحيطة بها، وتتدفق على السطح على شكل لابات انديزيتية مكونة المخاريط البركانية. وهي العمليات التي أدت إلى خلق نظام الأقواس البركانية في اليابان وسلاسل جبال الأنديز في أمريكا الجنوبية.

إن حلقة النار التي تطوق المحيط الهادي مرافقة مع انفراز وانصهار صفيحة المحيط الهادي، حيث تندفع من البراكين في هذا النطاق النشاط لابات ذات محتوى متوسط من السيليكا. ومثالا البراكين المولفة لسلسلة جبال كاسكاد Cascade في شمال غرب الولايات المتحدة، بما فيها جبال سانت هيلين St. Helens ورينيير Rainier وشاستا Shasta.

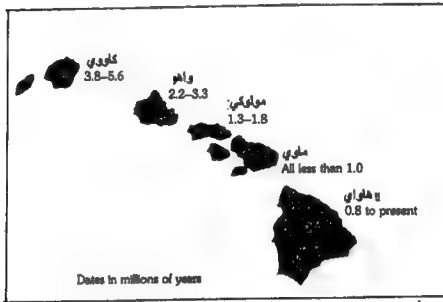
### ٣- البركة داخل الصفائح Intraplate volcanism

يصعب تحديد العمليات التي تحرض النشاط البركاني داخل الصفائح الصلبة للغلاف الصخري. وقد نجم عن هذا النشاط تدفقات ذات تركيب ريوليئي من الخفان والرماد البركاني في يلوستون Yellowstone والمناطق القريبة منها في الولايات المتحدة، وتدفقات ذات تركيب بازلتي غطت مساحات واسعة من الشمال الغربي لهذه المنطقة. بما أن اللابات البازلتية موجودة في القارات وفي الأحواض المحيطية، فإن ذلك يدعو للقول إن الانصهار الجزئي لصخور المعطف العلوي هو السبب في هذا النشاط.

وقد بينت الدراسات الزلزالية في جزر هاواي أن مصدر اللابا البازلتية هو من الانصهار الجزئي لصخور المعطف العلوي. ولكن ما هو السبب في الانصهار الجزئي لصخور المعطف العلوي تحت صفائح الغلاف الصخري؟ لقد اقترح الباحثون أن تدرج الحرارة الأرضية يؤدي إلى وجود نطاق يقع على عمق يتراوح من (١٠٠-٢٥٠) كيلومتراً يحتوي على بعض الصهارة. ومن هذه الجيوب المنصهرة المسماة البقع الساخنة hot spots تنذف اللابات إلى السطح. ويفترض أن هذه النشاطات البركانية تحدث في الوقت التي تتحرك فيه الصفيحة القارية أو المحيطية

فوق البقعة الساخنة، مما يؤدي إلى تقبيها وتشققها وتنفق اللابا البازلتية (شكل ١٠-٩).

تدل المعلومات أن معظم البقع الساخنة ثابتة تقريباً في مكانها. ويعتقد أن جزر هاواي تكونت على التوالي في الوقت التي تتحرك فيه صفيحة المحيط الهادي فوق بقعة ساخنة (شكل ١٠-١٠). وقد أثبت ذلك من تحديد الأعمار المطلقة للجزر باستعمال طريقة بوتاسيوم - أرغون من (٢٧) موقعاً بركانياً. وإن جزيرة هاواي هي أحدث الجزر، وما زال اثنان من براكينها مونالوا وكيلاوا نشيطين إلى الآن. وقد تبين حديثاً أن تراكم بركانياً يتكون في قاع المحيط بالقرب من الجزر، مما يدعو للتنبؤ بأن جزيرة جديدة ستبرز وتتضمن إلى سلسلة الجزر.



شكل ١٠-١٠: يبين للتقريب في صر الجزر باتجاه جزيرة هاواي. وتشير الأرقام إلى ترويق تشكل الجزر بملايين السنين.

وبصورة عامة تخرج اللابا والرماد البركاني ذات التركيب الريوليتي من فوهات تقع في اتجاه اليابسة للهوامش القارية. وهذا يستدعي افراض أن انصهار القشرة

القارية يكون من الآليات المسؤولة عن تشكل المغما الغنية بالسيليكا. ولكن ما هي الآلية التي أدت إلى انصهار كميات كبيرة من المواد القارية؟

يقترح أحد الافتراضات أن كتلة قارية سمكية تقع أحياناً فوق صهارة صاعدة من البقع الساخنة، وبدلاً من أن تتدفق إلى السطح لتشكل اللابات البازلتية كما حدث في جزر هاواي، استقرت تحت الصفيحة القارية وأدت إلى انصهارها، وتكونت مغما غنية بالسيليكا، لا تلبث أن تصعد ببطء إلى الأعلى، وتستمد المغما الصاعدة حرارتها من النشاط المستمر للبقعة الساخنة. وقد يكون ما حدث في منطقة يلوستون ناتج عن مثل هذا النشاط.

لقد أجابت نظرية تكتونية الصفائح على عدد كبير من الأسئلة التي كانت موضوع جدل بين كثير من الجيولوجيين. لكن الآن أسئلة جديدة تطرح نفسها فمثلاً: كيف تنشأ البقع الساخنة؟ ولماذا تقع مراكز التوسع في بعض المناطق دون غيرها؟ هذا السؤالان فقط من بين عدد من الأسئلة لا يوجد لها إجابات حتى الآن.

### البراكين والحياة البشرية

لقد ساهمت النشاطات البركانية التي حدثت على سطح الأرض مساهمة فعالة ومفيدة للحياة. إذ أن الحياة للموجودة على سطح الأرض وفي الغلاف الجوي، تعود بأصلها إلى ما لفظته هذه النشاطات من أبخرة وغازات خلال أزمنة التاريخ الجيولوجي. كما أدت الاندفاعات البركانية تحت المحيطات إلى بناء الكثير من الجزر الحالية. ويبدو أنها مسؤولة أيضاً عن تشكل القارات. وما زالت في الوقت الحاضر تعمل في إضافة أجزاء جديدة إلى اليابسة. ففي عام ١٩٦٠ أضافت التلغقات من بركان كيلوا في جزيرة هاواي مساحة جديدة من اليابسة تقدر بـ (١,٣) كيلومتراً مربعاً.

وعندما تخضع تراكمات الرماد البركاني إلى عمليات التحوية ينتج منها ترب خصبة جداً. كما يمكن أن تزدهر الحياة النباتية فوق الرماد البركاني بعد سنة واحدة من استقراره. وقد لوحظ وجود غابات كثيفة تطورت فوق سطوح لابات لم يمض على تصلبها أكثر من (١٠٠) عام. وتتجدد خصوبة بعض الأراضي إثر

توضع الرماد البركاني فوقها. فالرماد البركاني يتشرب مياه الأمطار ويحتفظ بها فترة طويلة، وتحرر منه بسهولة مواد مهمة للحياة النباتية أهمها عنصر البوتاسيوم.

ويزيد الاهتمام في الوقت الحاضر بالمناطق البركانية من أجل الاستفادة من الطاقة الحرارية الأرضية Geothermal energy. ففي آيسلندا أُستفيد من المياه الجوفية الساخنة لتدفئة المنازل منذ عام ١٩٣٠، وحالياً يُستفيد منها ما يزيد على ٦٠٪ من السكان. كما يُستفاد حالياً من الأبخرة المنطلقة من الجحيزرات في توليد الطاقة الكهربائية بولاية كاليفورنيا.

وبالمقابل تؤدي النشاطات البركانية إلى أحداث تخريبية وأضرار جمة في الأرواح والممتلكات. وأكثر هذه الأحداث خطورة ما تسببه التلذقات اللايية. فالرقة الخصبة المتوفرة في المناطق البركانية تجتذب السكان المهتمين بالزراعة فتتوسع فيها المزارع والقرى للدرجة يمكن أن تمتد الزراعة إلى المنحدرات البركانية. وقد شهد التاريخ أحداثاً كارثية مروعة هاجمت فيها اللابات المتدفقة قرى كثيرة وغمرتها بسرعة، حيث حوصر سكانها وقُضي عليهم. يضاف إلى ذلك أخطار انطلاق وتراكم الرماد البركاني الذي يؤدي إلى دمار واسع النطاق. فاندفعات الرماد البركاني التي انطلقت في آيسلندا عام ١٧٨٣ على امتداد شق لاكي، ويقدر حجمها بـ (٣،٠) كيلو متراً مكعباً، وكان هذا الرماد مختلطاً مع الفاز الكبير في السام، حيث أدى إلى كوارث فادحة في المحاصيل الزراعية، وإلى القضاء على نصف الأبقار وثلاثة أرباع الغنم والأحصنة، وإلى إبادة ما يقرب من  $\frac{1}{5}$  السكان، وأعاقت نشاط الصيادين، وحدثت مجاعة استمرت لفترة من الزمن.

ونذكر أيضاً أن الرماد البركاني الناعم الذي انطلق بكميات هائلة من بركان تامبورا Tambora في أندونيسيا عام ١٨١٥ توزع في أجواء مختلف من أنحاء العالم وأدى إلى نقصان شدة أشعة الشمس التي تصل إلى سطح الأرض. نجم منها نقصان في معدلات الحرارة السنوية. ففي انكلترا هبط هذا المعدل بمعدل (١،٣) مئوية. وازدادت فيها أحداث الصقيع وبالتالي أدت إلى تلف المحاصيل الزراعية. وكان لها تأثيرات مماثلة في الولايات المتحدة حيث تواترت حوادث الصقيع، وأصبحت

تحدث في عدد من الولايات مرة على الأقل في كل شهر حتى في أشهر الصيف. وأدت إلى خسائر فادحة في المحاصيل الزراعية. ويمكن أن يؤدي حدوث نشاط بركاني مماثل في الوقت الحاضر إلى أضرار وخسائر أكثر بكثير وبخاصة مع تزايد عدد السكان ونقصان الموارد الغذائية.

ويمكن لبعض الانفجارات البركانية أن تقذف في الجو مسحات من الرماد البركاني والقطع الصخرية مرتفعة الحرارة، حيث تتساقط وتتدحرج على سفوح المنحدرات وتدمر كل ما يقع في طريقها بما فيها القرى والمدن.

# الفصل الحادي عشر

## تشوه الصخور وتكون الجبال

### مقدمة

إن سطح الأرض مؤلف من مرتفعات ومنخفضات، تتألف المنخفضات من أراضٍ منبسطة قد يوجد فيها بعض الأكمات كالكثبان الرملية أو تلال مؤلفة من صخور نازقة أتت عليها عوامل الحت المختلفة. أما المرتفعات فإن تضاريسها تكون أكثر تنوعاً فمنها الجبال المنفردة والهضاب، ومنها السلاسل الجبلية البسيطة والضخمة، يضاف إليها المرتفعات التي شكلتها الحادثات البركانية.

غير أنه يكون للمرتفعات، بالرغم من أن الصخور البركانية تشترك غالباً فيها بنسبة قد تكون كبيرة أحياناً، منشأ آخر. فهي تعد حصيلة الحركات التكتونية التي أصابت القشرة الأرضية وأدت إلى تشوهها. فالطبقات الصخرية التي تشكلت في قاع البحار والمحيطات والبحيرات في مستويات أفقية، تفقد أوضاعها الأولية أثناء هذه الحركات، فتتهضز أو تهبط وتتخذ أوضاعاً مائلة وتتجمع كما يتجمع الورق أو القماش، وتتكرر وقد يغطي بعضها بعضاً، حتى أنها تنقلب على بعضها أحياناً وتشكل هذه التشوهات معظم مرتفعات سطح الأرض.

إن دراسة ظواهر الحركات التكتونية من محددات ومقدرات وكسور تعرف

بالجيولوجيا البنيوية structural geology. وتبين هذه الدراسة أن جميع التشوهات التي تحدث في القشرة الأرضية يمكن تصنيفها بحسب صفاتها إلى مجموعتين كبيرتين:

أ - التشوه بالالتواء ويحدث عادة نتيجة القوى الأفقية حيث تشكل المناطق الملتوية والسلاسل الجبلية (الطيّات).

ب - التشوه بالتكسر ويحدث نتيجة القوى الشاقولية وتتميز بها المناطق المتصدعة.

## تشوه الصخور

من المعروف أن القشرة الأرضية هي غلاف صلب ذو حركية، ولا يمكن افتراض وجود الحركة فيها بدون وجود قوى هائلة تؤدي إلى سلوكية مرنة أو لدنة أو كسورية، وإلى تحرك المغمات داخلها وصعودها إلى السطح. لذلك لا بد لنا أن نتعرف على امكانات تشوه الصخور القشرة الأرضية.

تشوه الأجسام الصلبة بنتيجة خضوعها إلى قوى ضغط بطرائق رئيسة ثلاث وهي:

١- التشوه المرن **Elastic deformation**: وهو تشوه مؤقت يحدث في الجسم الصلب تحت تأثير قوى مطبقة عليه، بحيث يعود إلى شكله وحجمه الأصليين حين زوال القوة المؤثرة فيه.

٢- التشوه اللدن **Ductile deformation**: وهو تشوه دائم يحدث في الأجسام الصلبة حين تطبق عليها قوى تحت شروط خاصة تجعلها تتسلق سلوكاً لدناً. فإذا تجاوزت القوى المطبقة حداً معيناً يسمى حد المرونة **elastic limite**، فإن الجسم



لا يكون له قدرة كافية لاستعادة شكله وحجمه السابق ولو زالت القوى المؤثرة.

٣- التشوه الكسور **Brittle deformation**: وهو تشوه دائم أيضاً يؤدي إلى انهيار وتحطيم الجسم الصلب حين تؤدي القوى المطبقة عليه إلى تجاوز حد مرونته. ويمكن ملاحظة مختلف أنواع هذه التشوهات في الصخور المتكشفة على سطح الأرض، أو التي تُجرى عليها تجارب مخبرية.

ومن أجل التعرف على تشوه الصخور، لا بد لنا أن نعرف بعض الخصائص الأساسية للأجسام الصلبة، وأن نلاحظ سلوكية الأنواع الصخرية المختلفة في التجارب المخبرية على عينات منها بأشكال اسطوانية أو مكعبة، ونجعلها تخضع لقوى ضغط أو شد أو قتل تحت شروط محددة.

حين يخضع جسم إلى قوة ما فإنها تؤدي إلى تشوّه، تسمى هذه القوة **الجهد stress**. ويقاس الجهد عادة بوحدة ضغط على وحدة مساحة. فحين نقول إن الجهد يعادل باراً **Bar** واحداً يعني أنه معادل لضغط جوي واحد على سنتيمر مربع. وإن استخدام مصطلح الجهد عوضاً عن الضغط يعني قوة موجهة تؤدي للتشوه. لأن مفهوم الضغط في الموائع يعني ضغطاً متعادلاً في جميع الاتجاهات.

وحين تخضع الأجسام الصلبة لجهد ما فإنها تتجاوب بتغيير شكلها أو حجمها أو بكليهما معاً، ويستخدم مصطلح **إجهاد strain** لوصف هذا التغيير. فحين ينضغط قضيب معدني بجهد يؤدي إلى قصر طوله بمقدار ١٠٪. يوصف بأنه قد حدث فيه إجهاد بمقدار ١٠٪. كذلك الأمر في حالة تغير الحجم أو الشكل. فالجهد مقياس للقوى المؤدية للتشوه، والإجهاد مقياس لمقدار التغيير بالشكل أو الحجم أو الأبعاد.

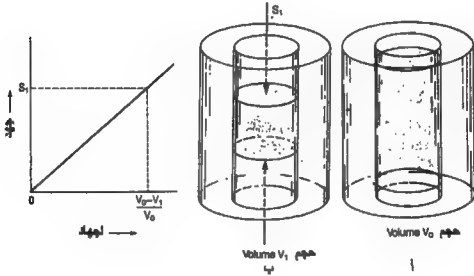
### التشوه المرن

إن أول من اكتشف أن علاقة الجهد بالإجهاد هي علاقة خطية هو العالم البريطاني روبرت هوك **Robert Hook**. وعرفت هذه العلاقة فيما بعد بقانون هوك وهو  $Q = \frac{F}{S}$ . حيث تمثل  $Q$  الإجهاد.

وتمثل  $F$  القوة مقدرة بالكيلوغرام.

وتمثل  $S$  وحدة المساحة مقدرة بالسنتيمتر المربع.

أي أن الاجهاد يتناسب طردياً مع الجهد وذلك عندما تكون القوة المطبقة تحت حد المرونة. وقد وجد بنتيجة تجاربه العديدة أن هذا القانون ينطبق على الأجسام الصلبة بما فيها الصغور (شكل ١-١١). والنقطة المهمة التي يجب ذكرها وهي أن لجميع الأجسام الصلبة حداً للمرونة بحيث تعود إلى شكلها وحجمها الأصليين حين تزول القوى المطبقة عليها قبل تجاوز هذا الحد. لذلك لا تترك الهزات الأرضية آثاراً في الصغور إذا لم تتجاوز حدود مرونتها. فاستطاعة من الرخام يمكن أن يطبق عليها ضغط بموازاة محورها يقل عن (٧٥٠) باراً دون أن يتغير فيها شيء، ولكن عند تجاوز الضغط لهذا الحد فإنها تتشوه وتحطم، أي أنها تتشوه تشوهاً كسوراً.

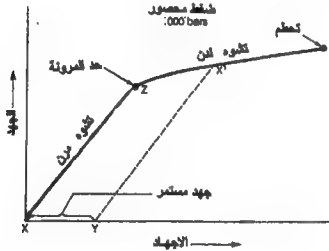


شكل ١-١١: يوضح قانون هوك الذي يتضمن علاقة الجهد بالاجهاد.

اسطوانة صخرية محاطة بخلاف معني متين وقد أخضعت لجهد  $S_1$  حيث نقص حجمها من  $V_0$  إلى  $V_1$ . والرسم البياني يوضح علاقة  $S_1$  (الجهد) بنقصان الحجم ( $V_0 - V_1$ ) (الاجهاد).

## التشوه اللدن

يمكن إعادة التجربة على اسطوانة أخرى من الرخام بعد إحاطتها بغلاف معدني متين. وبذلك نجعلها تخضع لضغط محصور مواز لمحورها فنحصل على نتائج مختلفة. ومع زيادة الضغط عليها بشكل تدريجي، نلاحظ أن الخط البياني للجهد والإجهاد يرتفع بشكل نظامي ضمن حدود مرونتها حتى يصل إلى النقطة  $Z$  (نقطة حد المرونة)، وذلك مبين في الشكل (٢-١١)، حيث يتحول الخط البياني للمستقيم إلى منحني يميل إلى الانسحاب. ويستمر ازدياد الضغط في هذه التجربة حتى النقطة  $Z$ ، ثم يزال الجهد، فنجد أن شكل اسطوانة الرخام قد تغير بين النقطتين  $Z$  و  $X_1$  دون أن تتحطم وعلى ذلك تكون النقطة  $Z$  هي نقطة عتبة المرونة  $yeild\ point$ ، ويكون التشوه في اسطوانة الرخام بعد تجاوز هذه العتبة هو تشوه لدن. وحين إعادة التجربة مع استمرار تطبيق الجهد وزيادة الضغط، فإن اسطوانة الرخام سوف تصل إلى حد تتحطم فيه بشكل فجائي، وبذلك تكون قد غصبت خلال هذه التجربة إلى ثلاثة أنواع من التشوه وهي المرن ثم اللدن وأخيراً الكسور.



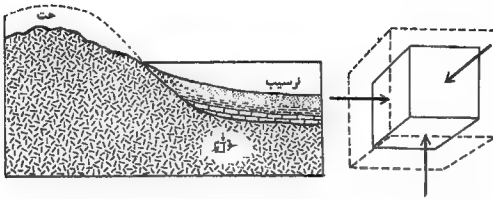
شكل ٢-١١: رسم بياني يوضح التشوه المرن من  $Z$  إلى  $X_1$  حيث يرجع الصغر إلى شكله الأصلي حين يزال الجهد المطبق. نقطة  $Z$  تشير إلى بدء التشوه اللدن. والخط  $XY$  معيار الاجهاد الدائم وغير القابل للعكس الناتج من التشوه اللدن.

لا بد في مجال دراسة تشوهات الصخور من تقويم الأهمية النسبية للتشوه اللدن المتجه نحو حدوث التشوه الكسور. فالشروط الأساسية التي تتحكم في مدى تشوه الأجسام تشوهاً لدناً قبل الوصول إلى عتبة التكسر هي: الضغط المحصور والحرارة والزمن والتركيب الصخري والمخاليل.

#### أ - تأثير الحرارة والضغط المحصور

إن ارتفاع درجة حرارة الجسم الصلب يزيد من لدنوته، وهذا يظهر في قضيب من الزجاج أو الفولاذ حين نحاول ثنيه بالدرجة العادية من الحرارة الأمر المؤدي إلى تكسره، إلا أن كلا النوعين يمكن ثنيه بسهولة عندما يستحان إلى درجة الاحمرار مثلاً. وإن رفع درجة حرارة الصخور يساعد على حركة جزئياتها وتجعل الصخور أكثر قابلية للتشوه اللدن. ولكن ارتفاع درجة الحرارة إلى ما فوق ١٠٠٠° مئوية، تصبح الصخور لينة ويمكن أن تسيّل. والتشوهات في هذه الحالة تعود إلى الانتقال من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة، وليس للتشوهات اللدنة مكان في هذا المجال.

أما أهمية الضغط المحصور أو الضغط الصخري التوازني Lithostatic pressure فهي غير معروفة تماماً في خبراتنا العادية، باستثناء بعض التجارب المخبرية. إلا أنه يمكن القول إن الضغط المحصور يميل إلى حفظ المادة قطعة واحدة مع التغيير في حجمها، وذلك لأن الضغط المطبق على الصخر متوازن في جميع الجهات كما يحدث في الضغط المائي التوازني على جسم مغمور في سائل ما. ويكون هذا الضغط مسيطر بصورة عامة على صخور القشرة الأرضية الموجودة في الأعماق. وبنتيجة هذا الضغط ينقص حجم الصخر وتزداد كثافته (شكل ١١-٣). وقد وجد نتيجة التجارب المخبرية أنه في حالة زيادة الضغط المحصور تزداد المقاومة الحدية وحد المرونة للصخور زيادة ملحوظة. فالصخور التي تسلك سلوك الأجسام الكسورية تحت الضغط العادي، يمكن أن تسلك سلوكاً لدناً يؤدي إلى إغنائها وتدفقها، إذا وجدت تحت ضغط محصور مناسب. فالحرارة العالية المرافقة مع الضغوط المحصورة المطبقة على الصخور الموجودة في أعماق القشرة الأرضية أو في المعطف تجعلها تنحني وتتطوي وتندفق.



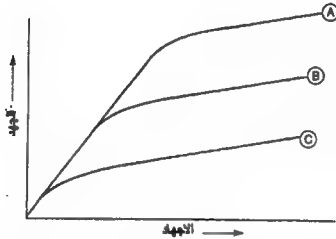
شكل ٣-١١: يوضح التشوه الحجمي بتأثير الضغط الصخري للتوازي.

## ٢- تأثير الضغط المحصور والزمن

إن الزمن دوراً مهماً في تشوه الصخور، مع أننا لا يمكن أن نلاحظ تأثيره في عبراتنا العامة. فالجهد المطبق على جسم صلب ينتقل تأثيره على جميع مكوناته الذرية، وعندما يتجاوز الجهد قوى الترابط بين الذرات فإنه يزيحها من أمكنتها الأصلية إلى أمكنة أخرى داخل الشبكات البلورية لكي تواجه تأثيره، أو يؤدي إلى تحطيم هذه القوى الترابطية. إلا أن الذرات المكونة للجسم الصلب لا تتحرك بسرعة. وحين يفترض أن تزايد الجهد يحدث بشكل بطيء جداً وتدرجي خلال فترة زمنية طويلة، بحيث يتيح المجال للذرات أن تتحرك وأن يعيد الجسم الصلب توازنه بتغيير شكله أو حجمه أو بالانتشاء والتنفق. ويصطلح على تسمية خصائص اللدونة الصخرية المعتمدة على الزمن بمعدل الاجهاد  $\text{strain rate}$ ، أي المعدل الذي يكون فيه الجسم مبحراً على التشوه اللدن. وتقاس معدلات الاجهاد بمقدار تغير حجم وحدة حجميه معينة في الثانية الواحدة. ففي التجارب المخبرية يقاس معدل الاجهاد بالوحدة  $10^{-6}/\text{ثا}$ ، وهذا يعني تغييراً حجمياً يقدر بواحد من مليون من وحدة حجمية بالثانية.

أما معدلات الإجهاد في باطن الأرض فهي أبطأ من ذلك بكثير، وقد تقلس  $10^{-14}$  نأ أو  $10^{-15}$  نأ، وكل ما قلَّ معدل الإجهاد في الصخر ازداد ميله إلى اللدونة.

والمقارنة الموجودة في الشكل (٤-١١) تشير إلى الحرارة المنخفضة ومعدل الإجهاد المرتفع يزيدان من قابلية الأجسام الصلبة للتكسر. وهذه الخصائص موجودة في صخور القشرة الأرضية السطحية لذلك يكون التشوه الكسور شائعاً فيها. وبالمقابل حين تكون الحرارة عالية والجهد عالياً ومعدل الإجهاد منخفضاً فإنها تزيد من قابلية التشوه اللدن، وهذه خصائص مميزة لصخور الأعماق في القشرة الأرضية والمعطف.



شكل ٤-١١: منحنيات بيانية لمواصلة لصخور قلبية تقع تحت ضغط محصور وتختلف عن بعضها بعضاً بدرجة الحرارة ومعدل الإجهاد. المنحني A - حرارة منخفضة ومعدل إجهاد عالي  
B - حرارة عالية ومعدل إجهاد عالي  
C - حرارة عالية مع معدل إجهاد منخفض.

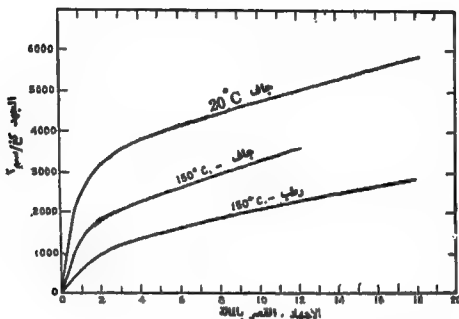
### ٣- تأثير التركيب الصخري

يؤثر التركيب الصخري بشكل كبير في لدونته وبخاصة نسبة الرطوبة فيه وتركيبه الفلزي. فالغشاوات المائية التي تملأ الفراغات الدقيقة بين حبيباته الفلزية تضعف من تماسك هذه الحبيبات بعضها مع بعض. لذلك يميل الصخر الرطب إلى اللدونة أكثر

من الصخر الجفاف. كما أن ضعف متانة الفلزات المكونة له يزيد من لزوجته والعكس صحيح. ومن الفلزات الضعيفة التي يساعد وجودها على التشوه نذكر الملح الصخري والكاربونات مثل الكالسيت والدولوميت، وفلزات السيليكا الصفاتحية مثل الغضاريات والكلوريت والميكا والسربنتين والثالك. أما الفلزات المتينة التي تُضعف التشوه اللدن للصخر وتزيد من ميله للتكسر نذكر منها فلزات النيوسيليكا مثل الأوليفين والغرينا وفلزات التكتوسيليكا مثل الكوارتز والفلدسبار، أما فلزات الإينوسيليكا مثل البيروكسين والأمفيبول فتعطي الصخور الحامية عليها خصائص تشوه تقع بين خصائص صخور الكوارتز وصخور الميكا. ولهذا فإن الصخور الكلسية والرخام والغضار الصفحي والاردواز والفيليت والشيست تتجاوب بسهولة بالتشوه اللدن، وإن صخور الكوارتزيت والغرانيت والغرانوديوريت والغناس تتجاوب بالتشوه الكسور. وحين يتعرض تعاقب صخري مؤلف من صخور تميل إلى اللدونة وأخرى تميل إلى الكسورة إلى جهود عالية فإن اختلاف تجاوبها يظهر واضحاً للعيان على كشفاتها. فالصخور القاسية تتكسر إلى كتل متطاولة تدعى بودين Boudins تملأ فيما بينها تدفقات الصخور اللدنة معطية ما يسمى بوديناج Boudinage (شكل ١١-٥، ص ٣٩٤).

#### ٤- تأثير المحاليل والحرارة

تلعب الفراغات والمحاليل الموجودة في الفراغات البينية للحبات المولفة للصخور دوراً هاماً في التغيرات التي تطرأ عليها. حيث تقوم المحاليل بالتفاعل مع المكونات الأولية للصخر بعد أن تذيبها وتشكل فلزات جديدة، وهذا ما يحدث غالباً في الصخور العميقة حيث تتعرض لضغوط عالية وحرارة مرتفعة. وكذلك تقوم المحاليل بلور زيت التشحيم فتسهل الانزلاق وتنقص الجهد اللازم لحدوثه كما هو واضح في الشكل (١١-٦).



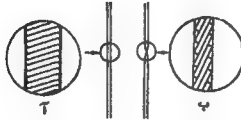
شكل ٦-١١: رسم بياني يوضح تأثير درجة الحرارة والمحتوى في تشوه الرغلام.

### حدوث التشوه اللدن

من النادر جداً ملاحظة حدوث التشوهات اللدنة في الصخور، فهي دائماً تحدث ببطء شديد وعلى أعماق كبيرة. إلا أن الصخور المشوهة تحوي دلائل كثيرة على حدوث حركات واسعة النطاق داخل الليتوسفير. فالتشوهات الواسعة النطاق ما هي إلا مجموع تشوهات محلية صغيرة جداً لا يمكن إحصاؤها، وهذه التشوهات الصغيرة يمكن أن تلاحظ وتدرس بشكل تفصيلي في المختبر، كما أن التجارب المخبرية مفتاح لفهم التشوهات الكبيرة الموجودة في السلاسل الجبلية. وفي هذا المجال لا بد أن نذكر بعض الدراسات المخبرية التي تمت على مواد معدنية وفلزات لا معدنية مثل الكالسيت والصفايح وكذلك التشوه اللدن للملح الصخري والصخور الكثيفة.



التشوه اللدن في المعادن: إذا أخذنا قضيباً من النحاس أو الألمنيوم وشدناه من طرفيه، لاحظنا أنه أصبح رقيقاً في نقطة ما ثم لا يلبث أن ينقطع بزيادة طفيفة للشد (شكل ٦-١١).



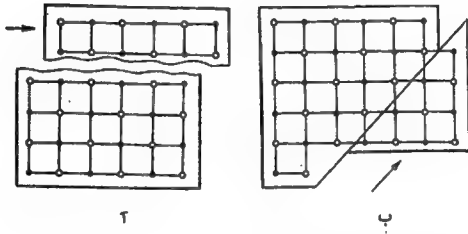
شكل ٦. ١١ (مكرر): تأثير قوى الشد على سلك من الألمنيوم  
أ - قبل الشد. ب - بعد الشد.

يمكن تمثيل ما يحدث في نقطة الانقطاع، إن عملية ترفيع السلك تتم بتقسيم السلك إلى عدد من الأقراص المستوية، تحدد سماكتها ووضعها بالخواص البلورية للمعدن المدروس. ومع استمرار الشد ينزلق كل قرص على الذي يليه، فيغير من وضعيته دون أن يضيع الاتصال معه. وتحدد صفات هذه العملية بخواص الشبكة البلورية المرتبطة بالترتيب الذري للمادة المدروسة.

التشوه اللدن في الملح الصخري: يتبلور الهاليت  $\text{NaCl}$  في النظام المكعي، حيث تتوضع أيونات الكلور والصدوديوم بالتناوب على رؤوس المكعب متحاوية في ذلك مع الشحنات الكهربائية السالبة والموجبة. ويحدد التأثير المتبادل في هذه الشحنات تركيب البلورة وخواصها. فإذا حاولنا أن نجعل بعض الجزئيات من البلورة تحمل حمل الأخرى في المستوى نفسه وبصورة موازية لأحد الصفوف، كما يتوضح في الرسم المبين الشكل (٧-١١)، فمن السهل معرفة اللحظة التي تتوضع فيها أيونات الصدوديوم والكلور جنباً إلى جنب مع مثيلاتها. وتأثير القوى الدافعة، والناجمة عن التماثل في

الشحنة الكهربائية، فإن جزيئات البلورة تبعد الواحدة عن الأخرى، وتنزلق البلورة على طول مستوى مواز لأحد الأوجه البلورية (على طول سطح الانقسام).

ويتغير ذلك كله إذا ما حاولنا إحلال جزء من البلورة محل جزء آخر باتجاه مواز للقطر أو عمودياً عليه. وهنا لا يظهر وجود قوى متنافرة بل يبقى الاتصال قائماً بين الجزيئات بالرغم من أن شكل البلورة الخارجي يتغير (شكل ٧-١١).



شكل ٧-١١: تنشوه في بلورة ملح صغرى  
أ - للاق ب - تنشوه لندن.

هنالك أنماط أخرى من التشوه اللدن معروفة أيضاً، وقد دُرِس بعضها بشكل جيد، مثل عملية القتل الميكانيكي Mechanical twinning التي تتمثل بشكل رئيس بدوران بعض الكتل من الشبكة البلورية بالنسبة لبعضها بعضاً، حيث تبقى الروابط بينها كما كانت عليه. وبهذا الشكل تنشوه بلورات الكالسيت وكذلك بلورات توائم الصفاح وبخاصة للكروكلين والالبيت.

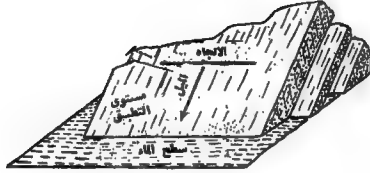
التشوه اللدن في الصخور الكثيفة: يلاحظ أن الصخور الكثيفة المولدة من تجمع فلزات متباينة، تنشوه من خلال تحركات الحبيبات المكونة للصخر، إذ إن هنالك

تشققات عديدة تنزلق عليها الحبيبات بالنسبة لبعضها بعضاً، وتبقى كل حبة من حبات الصخر محتفظة بذاتها واستقلالها رغم تحركها، ويحدث الالتحام بين الحبات مرة أخرى نتيجة الضغط المحصور الواقع على الصخر. ولهذا لا يظهر أثر للتمزقات التي حدثت عليها هذه الانزلاقات. ويبدو أن وجود غشاء رقيق من الماء مغلفاً كل حبة يساعد على التحرك.

## التشوه بالإلتواء وتشكل الطيات

يؤدي التشوه اللدن إلى التواء الصخور وتجعلها ويظهر ذلك بوضوح في الصخور الرسوبية لكونها مؤلفة من طبقات متتابعة، وتعد من الصخور اللينة بالنسبة إلى الصخور البلورية. ويمكن أن نلاحظ فيها مختلف أنواع الإلتواءات.

تظهر الإلتواءات بوضوح على امتداد السلاسل الجبلية، وبغض النظر عن حجم الصخر وتشوهه فإن التواء الصخور إجمالاً يعرف بالطي *fold*. وتحدد وضعية الطبقات المؤلفة له بعنصرين هما الميل والاتجاه. فالإتجاه *strike* هو اتجاه أي خط أفقي يقع على سطح التطبق *Bedding plane*، ويتشكل من تقاطع مستوي الطبقة مع مستوي أفقي. ويحدد اتجاه الطبقة بالزاوية التي تحصل بين خط أفقي في مستوي الطبقة مع خط الطول المار في المنطقة المعنية ويقاس بوساطة البوصلة. أما الميل *Dip* فيمثل انحدار الطبقة بالنسبة إلى مستوي أفقي، ويقاس بالزاوية التي تحصل بين الخط الأكثر انحداراً للطبقة مع المستوي الأفقي، أي الزاوية المحصورة بين مستوي الطبقة والمستوي الأفقي (شكل ٨-١١). إن لهذه القياسات أهمية كبيرة في وضع الخرائط الجيولوجية. وتمثل على الخريطة بوساطة خط صغير يمثل الاتجاه مزوداً بسهم عمودي عليه يبين انحدار الطبقة. ويكون طول السهم متناسباً عكسياً مع شدة انحدار الطبقة.

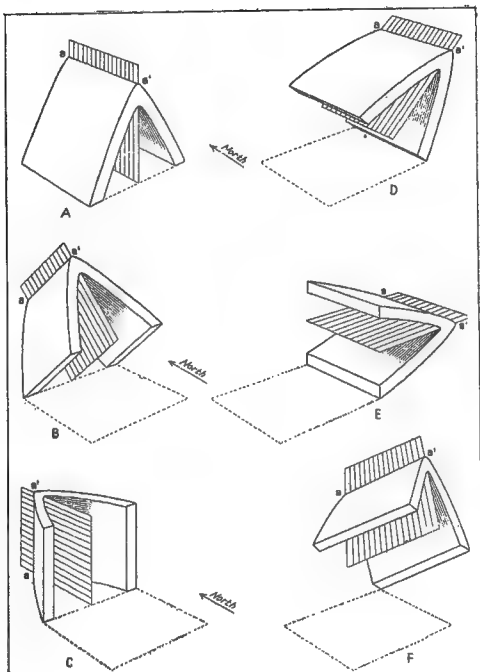


شكل ٨-١١: رسم تخطيطي يوضح للميل والاتجاه.

### أجزاء الطية Parts of fold

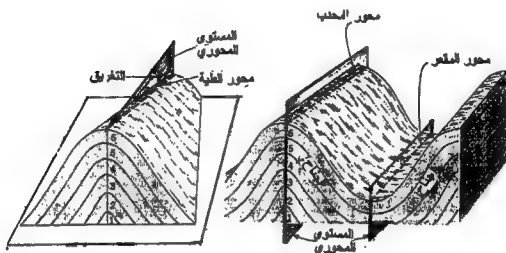
أ - المستوى المحوري **Axial plane**: وهو مستو وهمي يقسم الطية إلى قسمين متناظرين وقد يكون شاقولياً أو مائلاً أو أفقياً (شكل ٩-١١).

ب - محور الطية **Fold axis**: وهو خط وهمي ينتج من تقاطع المستوى المحوري مع مستوى أفقي ويحدد اتجاه الطية. وتتميز الطية ذات المحور المائل عن المستوى الأفقي باصطلاح الطية الغارقة **plunging fold**، كما تسمى زاوية ميل هذا المحور عن المستوى الأفقي بالتغريق **plunge**.



شكل ٩-١١: المستوى المحوري ووضعيته المختلفة. ويمثل الخط  $ab$  محور الطية

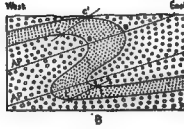
جـ - جناحا الطية **Fold limbs**: وهما جانبا الطية اللذان يمتدان من المستوى المحوري للطيّة إلى المستوى المحوري للطيّة الثانية (شكل ١١-١٠).



شكل ١١-١٠: يوضح عناصر الطية

د - خط اللروة **Crestal line**: وهو خط وهمي يمر من نقاط ذرى التحذب. وتعتبر أدق هو الخط الذي يصل بين أعلى نقاط موجودة على سطح أي تطبيق في الحذب. أما مستوى اللروة **crestal plane** فهو المستوى الذي يحوي خطوط اللرى.

هـ - خط الفور **Trough line**: وهو خط وهمي يمتد على طول أخفض أجزاء الطية، وتعتبر أدق هو الخط الذي يصل بين أخفض نقاط موجودة على سطح أي تطبيق في المقعر. ومستوى الفور **trough plane** هو المستوى الذي يحوي خطوط الفور (شكل ١١-١١).

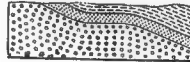
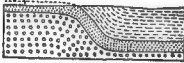


شكل ١١.١١: يوضح خط الذروة (C C) وخط الغور (t t) ومحور للطية (A A).

### التصنيف الهندسي أو الوصفي للطيات

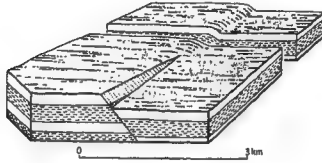
يعتمد هذا التصنيف على وصف هندسي للطيات حسب ما تظهر في مقطع عمودي على اتجاه المستوي المحوري، كما يعتمد على وضعية جناحي الطية ومستواها المحوري.

١- **الطية أحادية الميل Monoclinial fold**: وهي من أبسط أنواع الطيات، وهي التواءات وحيدة الجانب تكون فيها الطبقات الصخرية أفقية في جانب ومائلة في الجانب الآخر (شكل ١٢-١١). ومن أجل تصور الطية أحادية الميل يمكن أن نضع كتاباً على طاولة ونغطي جانبه بقطعة قماش مطبقة تمتد على الطاولة، وبذلك تأخذ قطعة القماش شكل الطية أحادية الميل.



شكل ١٢.١١: يوضح الطي أحادي الميل.

غالباً ما يكون تحت هذا النوع من الطي فالق وذلك في حالة وجود طبقات كسوره تحت الصخور الرسوبية (شكل ١١-١٣).



شكل ١١-١٣: طية أحادية الميل فوق فالق مفصلي.

٢- الطية المحدبة **Anticline fold** والطية المقعرة **Syncline fold**: إن معظم الطيات يكون أكثر تعقيداً من الطيات أحادية الميل، إذ تؤدي الجهود المطبقة على الصخور إلى طيها نحو الأعلى مشكلة الطي المحدب أو طيها نحو الأسفل مشكلة الطي المقعر. حيث تنحدر الطبقات في الطي المحدب باتجاه معاكس بدءاً من القمة. وتكون طبقات جناحي الطية أحدث من الطبقات التي في مركزها، بينما تكون طبقات جناحي الطية المقعرة أقدم من الطبقات التي في مركزها (شكل ١١-١٤).

٣- الطية المستقيمة أو المتناظرة **Symmetrical fold**: وهي الطية التي يكون فيها المستوى المحوري شاقولياً ويميل جناحاها في اتجاهين متضادين بمقدار متساوٍ.

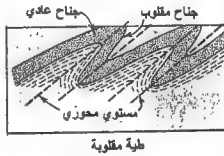
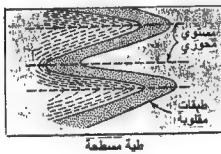
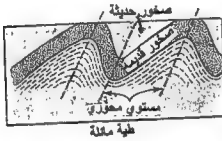
٤- طية مائلة أو غير متناظرة **Asymmetrical fold**: يكون المستوى المحوري مائلاً ويميل الجناحان بزوايتين واتجاهين مختلفين.

٥- الطي المسطح أو النائم **Recumbent fold**: يكون المستوى المحوري أفقياً.



ويحصل هذا النوع من الطي عندما توجد التواءات متراصة كما هو الحال في الطي الألي، حيث تترقق فيها بعض الطبقات من جراء الجهود المطبقة، ولهذا تكون طبقات الجانِب المسطح أقل سماكة من طبقات الجانِب الآخر. يتميز هذا النوع من الطيات بأن نواتها مكونة من صخور بلورية تعود للحقب الأول ومغطاة بصخور تعود للحقب الثاني. وعندما يمتد الطي المسطح لمسافات كبيرة يطلق عليها اسم طيات التغطية.

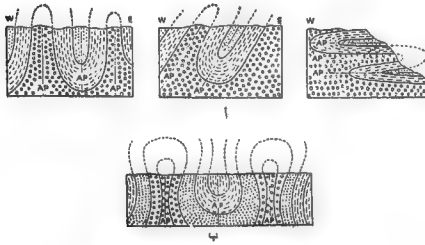
٦- الطية المقلوبة **Overtured fold**: يكون المستوى المحوري فيها مائلاً وينحدر جناحا الطية في جهة واحدة، لذلك يكون الجناح السفلي موجوداً بوضع مقلوب (أي أنه دار بزاوية أكثر من ٩٠°).



شكل ١١-١٤: يوضح أشكال الطيات.

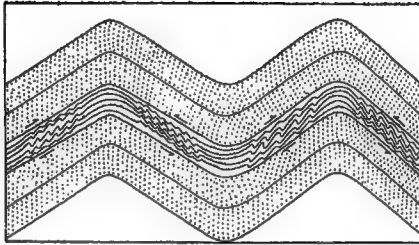
٧- الطية متساوية الميل **Isoclinal fold**: يكون جناحا الطية في هذا النوع متوازيين ويميلان باتجاه واحد، وقد يكون المستوي المحوري شاقولياً أو مائلاً أو أفقياً (شكل ١١-١٤).

٨- الطية المروحية **Fan fold**: يكون جناحا الطية مقلوبين حيث يميل الجناحان في اتجاه بعضهما بعضاً في الطية المروحية المحدبة، وعلى العكس في الطية المروحية المقعرة (شكل ١١-١٥).



شكل ١١-١٥: يوضح أشكال الطيات متساوية الميل والمروحية.  
أ - طيات متساوية الميل. ب - طيات مروحية

طيات السحب **Drag folds**: يتشكل هذا النمط من الطيات عندما تكون الطبقات المتعاقبة غير متجانسة، مثل تتابع طبقات كلسية مع طبقات غضارية. فتحت تأثير قوى دفع تماسية تتشكل طيات غير متجانسة، نتيجة انفصال وانزلاق الطبقات بعضها فوق بعض. فكل طية من الطبقات الكلسية تقابلها طيات متعددة من الغضار. وتلاحظ هذه الحالة بكثرة في سلاسل جبال الألب (شكل ١١-١٦).



شكل ١١-١٦: رسم تخطيطي يوضح للتجارب غير المتجانس للقوى، ويتشكل طيات الصعب.

قد يصعب أحياناً وللوهلة الأولى تحديد النماذج المختلفة للطيات من الملاحظة الحقلية لتكشف الطبقات، وبخاصة الطيات التي أتت عليها عمليات الحث السطحي، لذلك يلجأ الجيولوجيون عادة إلى دراسة وضعية الطبقات وتعاقبها لتمييز الطي المحدب والطي المقعر. وتساعد في بعض الأحيان ملاحظة تشققات الطين وظاهرة التطبق المتدرج والحدود المستحثة لبعض الدينان البحرية على تحديد وضعية الطبقات ومعرفة فيما إذا كانت الطية مقلوبة أم غير مقلوبة. وعندما يكون الطي ممتداً على نطاق واسع يصعب على الجيولوجي حين يفحص تكشفاً واحداً، أن يقرر فيما إذا كانت الطبقات الصخرية مطوية أم لا. ولكن حين يُوقع مختلف التكشفات الصخرية في منطقة دراسته على الخريطة الطبوغرافية بشكل دقيق يمكنه تمييز الطيات بشكل واضح. وتساعد أحياناً ظواهر الحث المتباين للطبقات المتجاورة المميزة بأشكال طبوغرافية خاصة على تمييز الطيات وتحديدتها (شكل ١١-٥).

إن الانحناءات الحقيقية للقشرة الأرضية باتجاه الأعلى أو الأسفل ما هي إلا طيات عميقا كبير جداً. وتظهر معالم هذه الطيات في المناطق الجافة التي تخلو أراضيها من الغطاء النباتي وتقطع صخورها أودية حتية للأنهيار والجاري المائية. وغالباً ما يكون الغطاء النباتي وكثافة الحياة النباتية عائلاً في سبيل تمييز هذه البنيات حتى لو وجدت بعض التكتشفات الصخرية. وفي جميع الأحوال يمكن للمسح الجيولوجي الدقيق أن يميز البنيات الإلتوائية الحقيقية في القشرة الأرضية حتى ولو كانت زوايا ميل الطبقات بمقدار درجة واحدة أو درجتين.

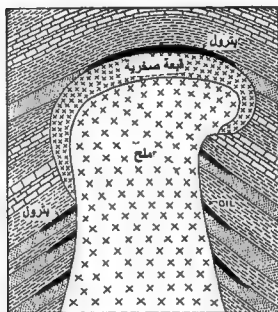
### تكتونية القباب الملحية Saline-dome tectonics

تعطي تكتونية الصخور الملحية مثلاً حسناً لتكتونية الكتل اللدنة المعقدة. فعندما توجد طبقات مؤلفة من صخور ملحية في مناطق معرضة لقوى الإلتواءات، فإن هذه الطبقات تسلك سلوك الأجسام اللدنة، فتندفع الصخور الملحية عبر نقاط الضعف في الغطاء الرسوبي، ويؤدي ذلك إلى تصدع الصخور التي تمر خلالها ودفع الطبقات التي تغطيها، وقد تنقبها وتشكل طيات خاصة بها تعرف بطيات الثقب، كما هو الحال في القباب الملحية الموجودة في منطقة غولف كوست Gulf Coast في الولايات المتحدة.

وقد يكون صعود الملح من تلقاء نفسه دون تأثير الحركات التكتونية، كما هو الحال في القباب الموجودة في منطقة شمال بحر قزوين في روسيا. حيث يصعد الملح تحت تأثير ثقل الطبقات المتوضعة فوقه، خلال المناطق الأقل مقاومة، على شكل أعمدة ترفع الطبقات التي تغطيها تدريجياً. ويستمر صعود الملح كما لو كان مؤلفاً من مادة لدنة للغاية، ليحتل في القشرة الأرضية موضعاً يتناسب مع كثافته المنخفضة. وقد يأتي الحث السطحي على الغطاء الرسوبي وتكشف طبقات الملح، أو ينقب الملح الطبقات المغطية ويتكشف على سطح الأرض. وهذا ما يفسر تشكل جبال الملح في جنوب الجزائر.

تأخذ القباب الملحية شكلاً اسطوانياً ذا قطر صغير بالنسبة إلى ارتفاعها. وتكون مؤلفة بمعظمها من الملح الصخري مع بعض الانهيدريت. وغالباً تعلو قممها قبة

صخرية مؤلفة من الجص والانهيدريت وصخور جرفتها من الأعماق، لا علاقة لها بصخور السطح. كما أن طلي الصخور وتصدعها بتتيحة صعود الملح يخلق بنايات ملائمة لتجمع البترول والغاز الطبيعي، لذلك تأخذ القباب الملحية أهمية كبيرة في التنقيب عن هذه المواد المفيدة (شكل ١٧-١١).



شكل ١٧-١١: يوضح للقبّة الملحية والمصادر البترولية المرافقة لها.

## التشوه بالتكسر وتشكل الفواصل والفوالق

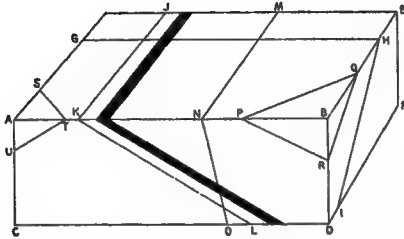
### الفواصل

حينما نتفحص مقلعاً أو تكشفاً صخرياً شاطئياً، نجد فيه بالإضافة لسطوح التطبيق تكسرات تقطع الصخور في اتجاهات تقرب من الشاقولية حين تكون الطبقات أفقية، تدعى الفواصل Joints. وتحصل الفواصل بصورة عامة وفق مجموعات مؤلفة من نوعين من الفواصل المتوازية. فإذا كانت الطبقات مائلة فإن أحد النوعين يقرب اتجاهه من موازاة اتجاه الميل، بينما يكون الآخر موازياً للاتجاه. ووجود مثل هذه الفواصل يساعد كثيراً عمال المقالع على مهمتهم الرئيسة بالحصول على كتل صخرية يقرب شكلها من مواشير قائمة الزوايا، وبخاصة حين يكون هنالك فواصل رئيسة.

توصف الفواصل بأنها مستويات كسور أو شقوقاً تتكون في الصخور الصلبة دون حدوث أي حركة أو انزلاق للكتل المنفصلة على سطوح التكسر. وقد تكون هذه السطوح في أغلب الحالات مستوية، كما يمكن أن تكون منحنية. تظهر الفواصل عادة في الصخور المسطحية أو القرية من السطح وتحدد بالاتجاه والميل فيقال إنها: فواصل اتجاه strike joints عندما تكون ذات اتجاه مواز لاتجاه الطبقات، وفواصل تطبيق bedding joints عندما تكون ذات اتجاه مواز لمستويات تطبيق الصخور، وتعرف بفواصل ميل dip joints عندما تكون ذات اتجاه مواز لاتجاه ميل الطبقات، أما الفواصل المنحرفة أو القطرية diagonal joints فتكون ذات اتجاه ينحرف عن اتجاه وميل الطبقات (شكل ١٨-١١).

يزواج امتداد الفواصل واتساعها من شقوق مجهرية إلى كسور ذات امتداد واتساع واضح. كما تزواج المسافة بين الفاصل والآخر من بضعة سنتيمترات إلى بضعة أمتار.

تكون الفواصل بأنواعها سهلة التعرض لعوامل التجوية. فهي تتوسع بفعل



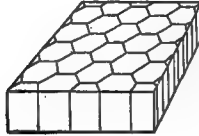
شكل ١٨-١١: يوضح الشكل المختلفة للفواصل. يمثل الخط الأسود العريض ميل الطبقة. ABCD، CHI، BDEF، MNO، PQR، STU فواصل منحرفة. JKL فاصل تطبق.

مياه الأمطار والتجلد والرياح وجذور النباتات، ونتيجة لتوسع هذه الفواصل تتشكل هياكل تشبه الجروف. وكذلك تهاجم الأمواج، على امتداد الشاطئ، الفواصل وتؤدي إلى تشكل بحايف وكهوف. ويمكن أن يتحكم نمط الفواصل في مجرى الأنهار، وكثيراً ما تشكل سطوح الفواصل جدران الخوانق Gorges والكانيونات شديدة الانحدار. ويبدو أن معظم الفواصل تنتج من قوى شد أو انضغاط.

### فواصل الشد Tension joints

تتشكل كنتيجة تأثير مباشر لقوى الشد. وقد يتولد فعل الشد عن فعل قوى ضاغطة، كما يحدث في السطوح العليا والسفلى للطبقات المكدبة والمقشرة للإلتواءات التي تشكلها. وقد يتولد فعل الشد عن فعل قوى ازدواجية، ومثال ذلك الشد الذي ينتج من الحركة النسيجية لجداري فالق في اتجاهين متعاكسين على مستوى سطح الفالق، مما يؤدي إلى تكوين فواصل شد في صخور سطح الفالق. وقد يتولد فعل الشد من تبرد وتصلب اللابات البركانية فتؤدي إلى تشكل فواصل عمداية

columnar joints، تظهر بوضوح في صخور البازلت على هيئة أعمدة شاقولية طويلة ذات مقطع غالباً ما يكون سداسياً (شكل ٧-١٠ والشكل ١٩-١١).



شكل ١٩-١١: مجسم تخطيطي يوضح الفواصل السداسية.

### فواصل الإنضغاط Compression joints

تتكون هذه الفواصل نتيجة فعل مباشر لقوى ضاغطة أو ازدواجية متعاكسة. وقد يصعب تمييز شقوق الشد أو الإنضغاط في العمل الحقلّي، إلا أن هنالك بعض القرائن التي تساعد على تحديد كل نوع منها. ففواصل الشد تكون مفتوحة وبالتالي تمتلئ برواسب ثانوية لاحقة. وهكذا عندما نجد رواسب ثانوية على هيئة عروق رقيقة ممتدة في اتجاهات منتظمة ومتساوية فإننا نقول إنها فواصل شد. أما فواصل الإنضغاط فهي غير مفتوحة في بداية تشكيلها ولكن عوامل التجوية قد تؤدي إلى توسعها ثم ملئها برواسب ثانوية. وفي هذه الحالة يصعب تمييزها عن فواصل الشد. وهناك قرائن أخرى نستطيع التمييز بها لا مجال للذكرها الآن.



## الفوالق

تؤدي الحركات الأرضية المفاجئة إلى حدوث تصدعات الكتل الصخرية وتحركها على امتدادها. ويدعى الصدع الذي تنزاح فيه الكتلتان الموجودتان على جانبيه عن بعضهما بعضاً بالفالق fault حيث يراكم الجهد المطبق على الصخور شيئاً فشيئاً ويحدث التشوه اللدن، وحين يتجاوز عتبة اللونة يحدث التصدع والتحرك، حتى توقف قوة الاحتكاك استمراره، ثم يبدأ تراكم الجهد من جديد حتى يتجاوز قوة الاحتكاك ويؤدي إلى التحرك من جديد على امتداد الشق الصخري. ويمكن أن تعيد هذه الحلقة نفسها عدة مرات، وقد يصل استمرار التحرك على امتداد فالق كبير إلى مسافات قد تبلغ بضع كيلومترات حيث تمثل عدداً من الحركات المفاجئة، وكل حركة مفاجئة ينجم منها زلزال أرضي قد يكون مدمراً حين ينجم من تحرك قريب من السطح. وأحياناً تحدث الحركة الفالقية على امتداد عدد من سطوح الانكسارات المتجاورة فتكوّن ما يسمى نطاق الفالق fault zone. وقد تحدث الحركة الفالقية فجأة وعلى فترة واحدة أو فترات متكررة، أو قد تحدث ببطء خلال فترة طويلة من الزمن. وإن حدوث التصدعات والفوالق يشكل أماكن ضعف داخل القشرة الأرضية، تتيح المجال للمواقع النارية الصاعدة عبر صخور القشرة (الغمامات والحماليل الهيدروترمالية) بأن تتحرك وتندس داخل الصخور أو تنلغ إلى سطح الأرض.

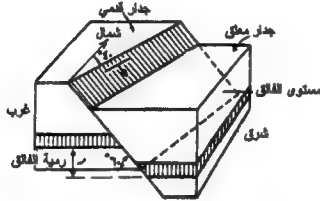
### عناصر الفالق

أ - مستوى الفالق Fault plane: يعرف أيضاً بسطح الفالق fault surface، وهو سطح الكسر الذي يحدث عليه انزلاق الكتل الصخرية على بعضها بعضاً. وقد يكون عمودياً أو مائلاً أو ملتوياً.

ب - جدار الفالق Fault wall: وهو الجانب السفلي أو العلوي للفالق. ويطلق عليه الجدار المعلق hanging wall الذي يقع فوق سطح الفالق المائل، والجدار

القدمي foot wall أو السفلي الذي يقع مباشرة تحت سطح الفالق المائل. أما في حالة الفالق الشاقولي فيكون جداراً يمينياً وجداراً يسارياً بالنسبة لاتجاه الفالق.

ح - رمية الفالق throw of fault: وهي المسافة التي تفصل بين القسمين المتصدعين. وتقاس عادة بالمسافة الشاقولية بين جداري الفالق (شكل ١١-٢٠).

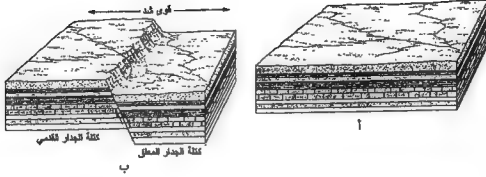


شكل ١١-٢٠: رسم هندسي يبين عناصر محددة للفق عادي باتجاه شمال ٤٠° شرق، ويميل بزاوية ٦٠° إلى الجنوب الشرقي، وهدية ر.

### تصنيف الفوالق:

يمكن تصنيف الفوالق حسب وضعية الطبقات المتصدعة واتجاهها بالنسبة إلى مستوى الفالق، ونوع القوة المسببة لها، واتجاه الحركة النسبية للكتل الصخرية، وأخيراً حسب مظاهرها في الطبيعة من حيث وجودها مفردة أي بسيطة أو مركبة.

٩- الفوالق العادية normal faults: يتميز هذا النوع من الفوالق بأن الجدار السفلي أو القدمي يقع في مستوى أعلى بالنسبة إلى الجدار المعلق. وتسببها قوى شد تباعد بين أجزاء من القشرة الأرضية لذا فهي تدل على التمدد الأرضي (شكل ١١-٢١).

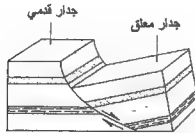


شكل ١١-٢١: مجسم تخطيطي يوضح تشكل الفالق العادي

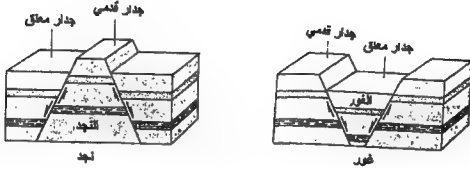
أ - وضعية الطبقات قبل حدوث الفالق

ب - يوضح الفالق العادي والمظهر الطبوغرافي الناتج منه، وتشير الأسهم إلى إتجاه القوى المؤثرة، وتُصانف الأسهم إلى الحركة النسبية لجداري الفالق (الكتل المتحركة).

يوجد في القشرة الأرضية مناطق كثيرة تعرضت لمراحل متكررة من التشوه الفالقي العادي. وعادة تحاط الأجزاء الناهضة أو الهابطة منها بفالقين عاديين أو أكثر. ويدعى الجزء الهابط بالغور graben كما يدعى الجزء الناهض بالحدج horst وأحياناً يدعى الجزء الهابط المجاور لفالق واحد بنصف الغور (شكل ١١-٢٢).



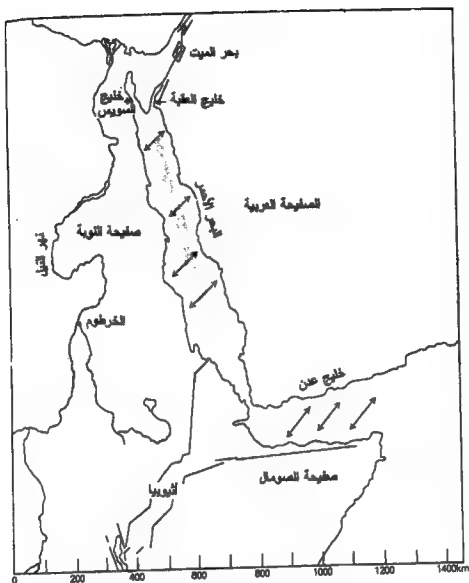
نصف الغور



شكل ٢٢-١١ رسم يوضح تشكل التجذ والغور ونصل الغور. وتكثير أنصاف السهم إلى الحركة النسبية للكتل المتحركة.

يعد نظام الغور الأفريقي أكثر الأمثلة شهرة في العالم ويدعى أحياناً الوادي الإنهدامي الأفريقي African Rift Valley، وهو يمثل سلسلة من التجود والأغوار ويمتد من بحيرة تانغانيكافا Tanganyika في أفريقيا باتجاه الشمال مسافة ٦٠٠٠ كم (شكل ١١-٢٣). وتوجد على امتداده أجزاء كثيرة ذات نشاطات بركانية أدت إلى تسرب الحممات واندلاع اللابات البركانية.

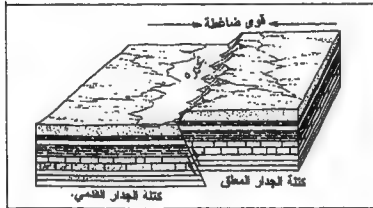
ونذكر هنا أمثلة أخرى وهي غور وادي ريو غراند Rio Grand في ولاية نيومكسيكو، والوادي النهرى لنهر الراين Rhine river في أوروبا الغربية الذي يمثل مجموعة من الأغوار، وأيضاً بحيرة البيكال Baikal في آسيا الوسطى وهي أعمق بحيرة في العالم وتتلأ مياهها العذبة غوراً عميقاً جداً.



شكل ١١-٢٣: رسم توضيحي للوادي الانهداسي الأفريقي الذي تشكل نتيجة تباعد الصفيحة العربية والصفيحة الأفريقية، ولدت إلى التفتاح البحر الأحمر وخليج عدن حسب ما تبينه الأسهم.

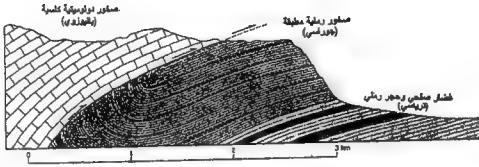
٢- الفوالق العكسية **Reverse faults**: ينشأ هذا النوع من الفوالق من جهود ضاغطة بحيث تكون الحركة الظاهرية للجدار المعلق إلى الأعلى بالنسبة إلى الجدار

القدمي، في عكس اتجاه ميل سطح الفالق (شكل ١١-٢٤) وترتبط الفوالق العكسية بحركات التقلص الأرضي لذلك تعرف بفوالق الانضغاط *compression faults*



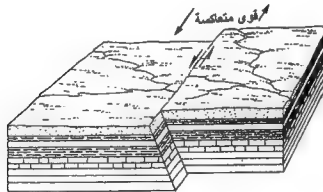
شكل ١١-٢٤: مجسم تخطيطي يوضح الفالق العكسي والمظهر الطبوغرافي الناتج منه وقد تشكلت فيه بحيرة. وتشير الأسهم إلى اتجاه القوى الضاغطة، وأصناف الأسهم إلى الحركة النسبية لجداري الفوالق.

تؤدي الجهود الضاغطة في هذا النوع من الفوالق إلى تحميل صخور أقدم فوق صخور أحدث، بحيث تقصر أجزاء من القشرة الأرضية وتزيد من سماكتها. وتدعى الفوالق الضخمة من هذا النوع بفوالق الدثر أو التحميل *thrust faults*، وعادة تكون لمستوياتها الفالقية زوايا ميل أقل من (٤٥) درجة، وهي شائعة الوجود في السلاسل الجبلية الكبرى مثل جبال الألب. وتتميز هذه الفوالق بتحريك كتل صخرية هائلة مسافات تبلغ أحياناً بضعة كيلومترات فوق الجدار القدمي. وتكون عادة الكتل الصخرية للجدار المعلق ذات سماكات كبيرة تصل إلى ألوف الأمتار، وقد تظهر طبقات الصخور فيها شبه موازية للصخور الأحدث الواقعة تحتها لتظهر كأنها تتابع طبقي عادي (شكل ١١-٢٥).



شكل ٢٥٠١١: مقطع في لفاق تصميل يظهر تراكب صخور دواوميتية كلسية (بازالدي) فوق تنسيلات رملية مطبقة (جوراسي) وخضار صلحي وحجر رملي (ترياسي). وتشير كُصاف الأسهم إلى حركة الجدار المقطع إلى الأعلى.

٣- فوالق الاتجاه الانزلاقية **Strike - slip faults**: وهي فوالق شديدة الميل أو شاقولية تتباعد فيها الكتل الصخرية على جانبي الفالق بحركة انزلاقية أفقية (شكل ٢٦-١١).



شكل ٢٦-١١: مجسم تخطيطي يوضح لفاق الاتجاه الانزلاقي. ويوضح أيضاً حركة الكتل الانزلاقية الأفقية.

يعد فائق سان اندرياس San Andreas من أشهر فوالق الانزلاق الأفقي ويتميز بتحرك جانبي يميني (أي أن الفائق نفسه يتحرك نحو اليمين). ويوصف أنه فائق اتجاه الانزلاق ذو تحرك جانبي يميني **right lateral strike-slip fault**. ويُعتقد أن الحركات النشطة مستمرة فيه منذ أزمنة الكريتاسي حتى الآن أي منذ نحو (٦٥) مليون سنة. أما مقدار التحرك الاجمالي فهو غير معروف تماماً، إلا أن بعض الدلائل تشير إلى نحو (٦٠٠) كيلومتر (شكل ٩-١٤).

ففي عام ١٩٠٦ حدث تحرك أرضي مفاجئ على امتداد هذا الفائق وأدى إلى ازاحة أفقية لبعض الطرقات وأعمدة السياجات مسافة مقدارها (٧) أمتار. وكانت هذه الازاحة مرافقة لزلازل سان فرانسيسكو. وأيضاً حدث في عام ١٩٤٠ زلزال آخر مع تحرك أفقي على امتداد الفائق نفسه في وادي اميريال الواقع على بعد (٨٠٠) كيلومتراً جنوب شرق سان فرانسيسكو وبلغ مقدار الازاحة قرابة (٥,٥) متراً، تحركت فيها صفوف من أشجار الفاكهة وتحطمت السياجات.

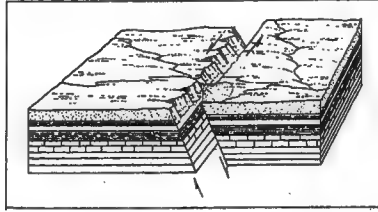
يبدو أن التحرك الأفقي للكتل الصخرية على جانبي هذا الفائق هو سلوك مميز له. ويعود ذلك إلى أن فائق سان اندرياس فائق حدودي بين صفيحتين من صفائح الليتوسفير تتحركان معاً على امتداده بحيث تسبق الواحدة الأخرى وتنزلق بالنسبة إليها. والحركات الزلزالية المفاجئة تعبير عن التشوه الذي تسببه جهود مطبقة على الصفيحتين تقع على أعماق متفاوتة من الكيلومترات.

ومن الجدير بالذكر أن تحرك الكتل الصخرية على امتداد هذا الفائق لا يكون دائماً مفاجئاً أو متوافقاً مع زلازل قوي. فقد دلت الدراسات الدقيقة التي أجريت على امتداد فائق سان اندرياس على وجود أماكن يحدث فيها انزلاق تدريجي وثابت بين الصفيحتين المتحركتين يصل معدلها إلى (٥) سنتيمترات في السنة. ويبدو من ذلك أن هنالك حالات يستمر فيها الانزلاق قرب السطح مع استمرار التشوه اللدن في الأعماق.

٤- فوالق الانزلاق المائل **Oblique slip faults**: وهي الفوالق التي تكون فيها حركة الكتل الصخرية تشمل حركة شاقولية وحركة أفقية. أي ناجمة من تضافر



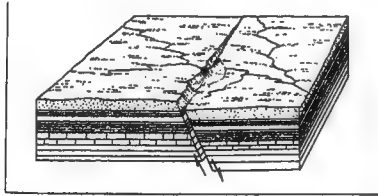
أقوى التي تسبب فوالق الاتجاه الإنزلاقية والفوالق العادية (شكل ٢٨-١١).



شكل ٢٨-١١: فالق الإنزلاقي العادي.

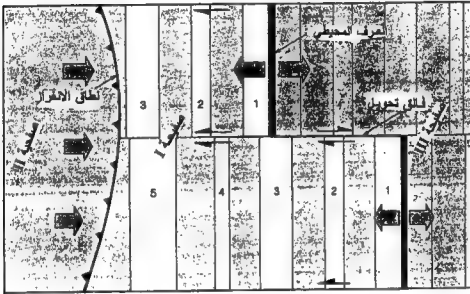
يوضح الرسم الأربعة الشاقولية بين الطبقات المتماثلة لجداري الفالق، وأن الجدار السفلي يقع في مستوى أعلى بالنسبة إلى الجدار المعلق. كما يوضح أيضاً الإزاحة الأتقية بين الجدارين والمظاهر الطوبوغرافية للتلالمة من تشكل الفالق.

هـ فوالق مفصلية **Hing faults**: يتميز هذا النوع من الفوالق أن الحركة الفالقية تكون منحنية أو دورانية وتتشابك في نقطة معينة على امتداد اتجاه الطبقات كما هو واضح في الشكل (٢٩-١١)، وتسبب هذه الحركة قوى شد شاقولية تباعد بين الكتلتين الصخريتين.



شكل ٢٩-١١: فالق مفصلي تشير أوصاف الأسهم إلى الحركة التسيبية لجداري الفالق.

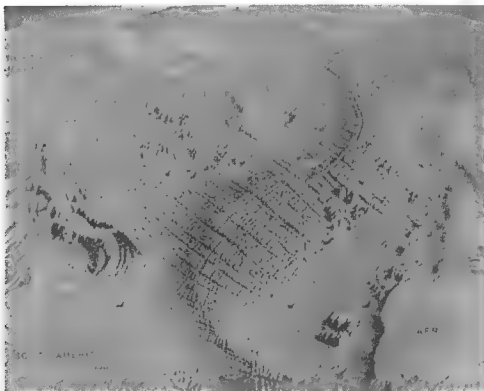
٦- فوالق التحويل Transform faults: وهي نوع خاص من فوالق الانجماخ الانزلاقية شائع الانتشار في قشرة المحيطات. وتعرض هذه الفوالق أعراف المحيطات وتقطعها عرضياً (شكل ١١-٣٠). وقد اصطلح على تسميتها فوالق التحويل لأنها تشمل تحولاً فجائياً يفصل بين هياكل أرضية متباينة.



شكل ١١-٣٠ : رسم مبسط يوضح للاق تحويل يقطع عرضياً العرف المحيطي، حيث تتحرك القشرة على جانبي جزئي العرف المحيطي جانبياً مبتعدة بعضها عن بعض، بينما تتحرك القشرة بين جزئي العرف على امتداد جانبي الفالق في اتجاهين متعاكسين، ويمثل الخط المسنن نطاق انغراز القشرة المحيطية تحت القشرة القارية. تشير الأسهم إلى حركة القشرة المحيطية. وتشير أوصاف الأسهم إلى الحركة النسبية للكتل المتحركة على جانبي الفالق.

توجد ثلاث هياكل بنوية رئيسة تحدد معالم تشوهات القشرة الأرضية وهي: خنادق المحيطات وأعرافها وفوالق التحويل. وهي هياكل متصلة بعضها مع بعض وتشكل شبكة تحيط بالأرض (شكل ١١-٣١). لقد كان العالم الكندي ويلسون Wilson أول من لاحظ هذه العلاقة الشبكية بين أنواع هذه الفوالق الرئيسية. أما الحركات التي تحدث على امتداد فوالق التحويل التي تقطع أعراف المحيطات فهي

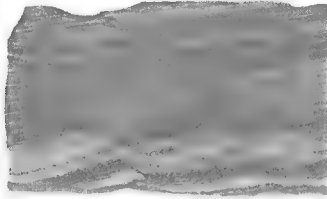
حركات إنزلاقية أفقية تسببها إضافة صخور جديدة إلى القشرة الأرضية على امتداد أعراف المحيطات، وبذلك تجعل أجزاء من القشرة الأرضية تتحرك بعيداً عن أعراف المحيطات، وبالوقت نفسه يجري استهلاكها تدريجياً على امتداد الفوالق العكسية في خنادق المحيطات.



شكل ٣١-١١: منظر لقاع محيط الأطلسي بمعالمه المتباينة الأشكال (إذا ما فرغت مياهه). ويوضح علاقة مرتفعات العرف المحيطي والخندق المحيطي بلوالب التحويل.

## دلائل الحركات الفالقية

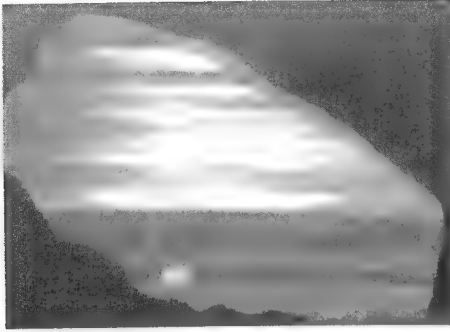
عندما نلاحظ تشققات في كتلة صخرية فإنه يصعب للوهلة الأولى أن نقرر فيما إذا كان على امتدادها ظواهر تحرك. ففي صخر ناري حبيبي متجانس المظهر كالغرانيت، أو في صخور رسوبية ناعمة التطبيق، لا يمكننا أن نميز آثار التحرك أو الإزاحة. إلا أن إمعان النظر في سطوح التشققات أو في سطوح جدران الفوالق تظهر آثار الحركة كما يمكن أن تظهر اتجاه الحركة. ففي جدار بعض الفوالق يمكن تمييز التواءات أو طي لبعض الطبقات نتيجة الشد والاحتكاك أثناء التحرك الفالقي، وتعرف هذه البنيات الالتوائية بالسحب الفالقي fault drag (شكل ١١-٣٢).



0 5 cm

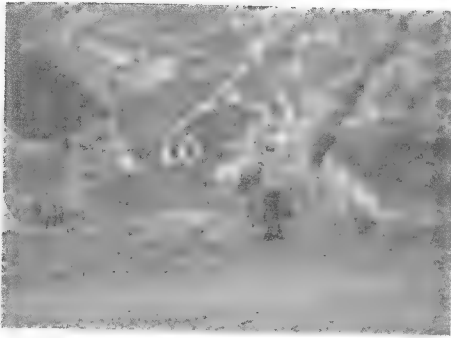
شكل ٣٢-١١: سحب فالقي مجاور لفالق صغير يقطع الحجر الرملي. ويلاحظ في طبقات إحدى جداري الفالق. وتشير أنصاف الأسهم إلى الحركة النسبية لجداري الفالق.

يضاف إلى ذلك أن احتكاك الكتل الصخرية المتحركة بتماس بعضها مع بعض يؤدي إلى حقل السطوح الانزلاقية وإلى تخزينها طولانياً على امتداد التحرك وتدعى السطوح المصقولة Slikensides وتفيد ملاحظة الجوانب المصقولة والمحززة في تحديد اتجاهات الحركة، أو على الأقل اتجاه آخر حركة (شكل ١١-٣٣).



شكل ٣٣.١١: سطح مصقول ومحزّز لنجم من الفائق، وقد تطورت فوق سطح بالزتي.

إن السطوح الفالقية لا تكون دائماً مصقولة أو محززة، فقد يظهر فيها وعلى امتدادها كتل صخرية تجمعية ذات مظهر حصوي بريشي، تكون حصاها على الغالب من نوع صخري واحد تدعى البريش الفالقي *fault breccia* (شكل ١١-٣٤). وفي بعض الأحيان يلاحظ وجود صخور مسحوقة سحقاً ناعماً على امتداد مستوى الفائق، وقد تصل فيها عمليات السحق لدرجة يصعب تمييزها حتى تحت المجهر.



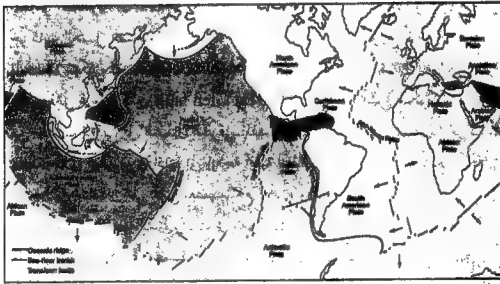
شكل ١١-٢٤: بريس فالكلي يظهر فيه قطع زاوية من القليلين تجمعها مولا صخرية مسحوقة.

### دلائل على حدوث التشوهات القديمة

توجد إلى جانب ملاحظة حدوث تشوهات مفاجئة أو بطيئة في الوقت الحالي دلائل تشير إلى حدوث الكثير من التشوهات في الأزمنة القديمة، ولقد ساهمت الدراسات الطبوغرافية الغزيرة التي أجريت فوق اليابسة أو تحت سطح البحر في توفير الكثير من الدلائل على حدوث التشوهات في القشرة الأرضية منذ القديم. وقد لوحظ في بعض مناطق العالم، من خلال دراسة توزيع الأنواع الصخرية المختلفة، وجود شواهد تشير إلى حدوث تحركات أفقية يصل مداها إلى مئات الكيلومترات، وحدثت تحركات شاقولية واسعة المدى وسوف نأتي على دراسة بعض الأمثلة ونبدأ بالمظاهر الطبوغرافية.

المظاهر الطبوغرافية **Topographic features**: لقد لوحظ في كثير من أنحاء العالم وجود مصاطب شاطئية متدرجة ترتفع فوق مستوى البحر وتحوي جروفاً ناجمة من تصادم البحر مع اليابسة. فمثلاً يوجد على امتداد الشاطئ الجنوبي لولاية

كاليفورنيا والجزر المجاورة مصاطب بحرية متدرجة يصل ارتفاع أعلاها إلى قرابة (٤٥٠) متر فوق مستوى سطح البحر. وهذا يشير إلى أن جزءاً من شاطئ هذه الولاية تعرض إلى عمليات نهوض متتالية تفصل بينها فترات هدوء كانت كافية لتشكيل مصاطب هذه الجروف الشاطئية. وقد لوحظ أيضاً أن ارتفاع هذه المصاطب يتغير من موقع لآخر، مما يشير إلى أن نهوضاً غير نظامي سببته الضغوط المتولدة بين الصفيحتين المتحركتين (صفيحة كاليفورنيا وصفيحة المحيط الهادي) أو أن الحد الفالقي بينهما يمر بالقرب من هذه الشواطئ (شكل ٣٥-١١).



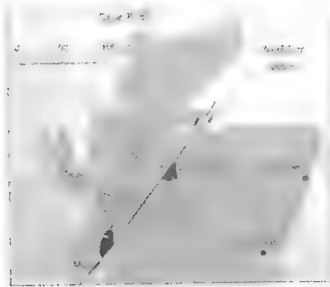
شكل ٣٥-١١: رسم يوضح صفيحة القاع الصخري الستة، وعددًا من الصفيحة الصغيرة.

ونذكر هنا مثلاً آخر على دلائل طبوغرافية تشير إلى حدوث هبوط واسع

النطاق في اليابسة، وهو في قاع البحر القريب من جزر ألوتيان Aleutian islands. حيث لوحظ وجود جبال شاهقة ومرتفعات وهضاب تحت البحر خلقت فيها المجاري المائية أودية تفصل فيما بينها، وهي بحملها تمثل نظام جريان مائي متطور بشكل جيد. وهذا يدل على أن جزءاً من اليابسة قد غمرته مياه البحر بنتيجة هبوط تدريجي، أو أن مستوى البحر قد ارتفع وغمر جزءاً من هذه اليابسة. ومن المعروف أن مستوى سطح البحر قد ارتفع عقب انتهاء العصر الجليدي بمعدل (١٠٠) متر تقريباً. إلا أن التضاريس تحت البحرية الموجودة قرب هذه الجزر تقع على أعماق قد تزيد على (٤٠٠) متر وهذا يرجح افتراض هبوط اليابسة بشكل تدريجي.

**المظاهر الصخرية Bedrock features:** يمكن العثور على دلائل وفيرة على تحركات الكتل الصخرية الضخمة من خلال دراسات توزيع أنواع الصخور المختلفة، وبكفي أن نذكر هنا مثالاً واحداً لاثبات ذلك. وهو توزيع الصخور على امتداد فائق غريت كلين Great Glen fault الذي يقطع أراضي سكوتلندا متجهاً من الجنوب الغربي إلى الشمال الشرقي. لقد كان هذا الفائق مصحوباً بحركات نشطة خلال الباليوزوي أدت إلى إزاحة أفقية لنطاقات استحالية، ووضع سحنتين استحاليتين مختلفتين على تماس بعضهما مع بعض، وهما سحنة البيوتيت إلى الجنوب التي تتحول إلى سحنة السيليمانيت في الشمال. كما أزاح جزئي كتلة ضخمة من صخور الترانست بعضهما عن بعض مسافة تبلغ (١٠٠) كيلو متر (شكل ١١-٣٦). وهذه المظاهر ما هي إلا دلائل قوية على حدوث الإزاحات الأفقية واسعة النطاق.





شكل ١١-٣٦: يوضح الفالق غربيت كلين في سكوتلندا يكسر كتلة الغرانيت إلى كتلتين، وإن الحركة الأفقية على طول الفالق أدت إلى إزاحتهما عن بعضهما البعض مسافة تقرب من ١٠٠ كم.

### علاقة الطيات بالفوالق:

يمكن للطيات والفوالق أن ينسب بعضهما إلى بعض وفق أوجه متنوعة. وكما رأينا في الشكل (١١-٣٢) امكان التواء الطبقات قرب الفوالق الكبيرة بتأثير قوى الشد والاحتكاك وتشكل طيات السحب الفالقي. كما يمكن للفوالق شديدة الميل أن تمر في أعلاها أو في أسفلها داخل طية وتزول معالمهما. ويعد الفالق المفصلي مثلاً على تحول الفالق إلى طية أحادية الميل (شكل ١١-١٣). ويمكن أن تتشكل فوالق الدثر أو التحميل في الطبقات التي تتعرض إلى طي شديد وتشكل طيات منقلبة. وكثيراً ما تتحطم الطيات نتيجة الانضغاط الشديد قرب مستواها المحوري (شكل ١١-٢٥). وهنا لا بد أن نذكر أن عمليات الطي لا تصيب الطبقات الصخرية فحسب بل إنها تصيب فوالق التحميل أو الدثر مجد ذاتها. وفي مثل هذه الحالات يكون تفسيرها موضوعاً صعب الحل.

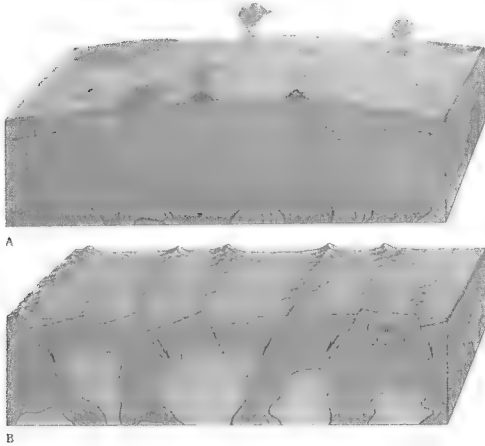
## تكوّن الجبال

يدعى تطور ونهوض أجزاء قارية من القشرة الأرضية على شكل سلاسل جبلية ضخمة مثل جبال الهيمالايا والألب والأيالاش والأورال والأنديز، تكوّن الجبال *orogenesis* أو بناء الجبال *mountain building*. وتبقى السلاسل الجبلية القديمة، التي أتى عليها الحسّ ومهدّها إلى أراضٍ سهلية محتفظة بسجل تطورها، المتمثل بظواهر التشوه الشديد والاستحالة والاندساس الناري والنشاط البركاني.

تحتوي القارات على نوعين من الوحدات البنيوية، أولهما كتلة من الصخور القديمة، تعود لأزمنة ما قبل الكامبري، تتألف من صخور استحالية ونارية مترافقة أحياناً مع صخور رسوبية، وهي تعدّ النواة الأولية للقارات وتعرف بالدرّوع القارية *continental shields* وقد لوحظ احتواء الدرّوع القارية على بنيات اللابئات الواسدية *pillow lavas* التي توافّق مع رسوبات صوانية كيميائية المنشأ، مما يشير إلى أن هذه الصخور الأولية للقارات قد تشكّلت من اندفاعات بركانية تحت البحر.

أما النوع الثاني فيتألف من تشكيلات رسوبية ونارية وبركانية تولّف بمعظمها كتلاً جبلية ناهضة تحيط بالدرّوع القارية، حيث تزداد حدّة الابتعاد عنها نحو البحر. وتختلف هذه الجبال بعضها عن بعض في المنشأ والشكل والحجم والطبيعة

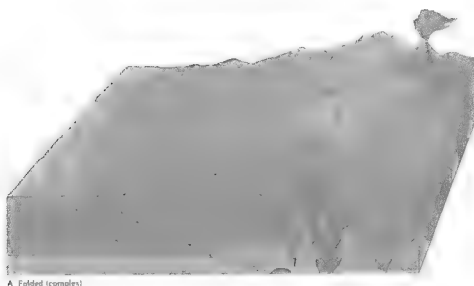
الصخرية، ويصعب تصنيفها. ويمكن الاعتماد على هياتها الافردية المرتبطة بأسباب  
النشوء أن تصنف في مجموعات ثلاث هي الجبال البركانية volcanic mountains  
وجبال الكتل الفالقية أو الجبال الصدعية fault block mountains وجبال الطي  
fold mountains (شكل ٣٧-١١).



شكل ٣٧-١١: يوضح الجبال البركانية أ، والجبال الصدعية ب.

تنشأ الجبال البركانية من تكلس اللابات والحمم البركانية فوق سطح  
الأرض، وتنشأ جبال الكتل الفالقية من نهوض كتل من القشرة الأرضية نتيجة

تكسرها بفوالق عادية. أما جبال الطي فهي أكثر الجبال أهمية وانتشاراً. وبالرغم من أن الطي هو المظهر المميز، إلا أن الصدع والاستحالة والنشاط البركاني متضافرة معه وبدرجات متفاوتة في بناء هذه الجبال وتنشأ **جبال الطي** من انضغاط ونهوض أحزمة طولانية من القشرة الأرضية مكسرة بفوالق عكسية (شكل ١١-٣٨)، وهي تتميز باحتوائها على هياكل ومظاهر بنيوية توحى بأنها قد مرت بمراحل تاريخية متماثلة، وتدعى عادة الأنظمة الجبلية **mountain systems**.



شكل ١١-٣٨: جبال طي معقدة.

### هياكل الأنظمة الجبلية

تشمل الأنظمة الجبلية أضخم السلاسل الجبلية وأكثرها تعقيداً منها السلاسل الجبلية الحديثة التي تمتد على طول الطرف الغربي للأمريكتين وسلسلة جبال الألب - هيمالايا التي تمتد من البحر المتوسط إلى إيران ثم شمال الهند والهند الصينية

Indochina، وكذلك جبال غربي المحيط الهادي التي تشمل أقواس جزر ناضجة مثل اليابان والفلبين وسومطرة. وقد تشكلت هذه الجبال خلال فترة المائة مليون سنة الماضية ما عدا جبال هيمالايا التي ابتدأ تشكلها في مدى زمني أقرب لا يزيد على (٤٠) مليون سنة مضت. ونذكر بالإضافة إلى هذه السلاسل الجبلية الحديثة سلاسل جبلية قديمة تشكلت منذ الكامبري وما قبل الكامبري وهي جبال الآبالاش في الولايات المتحدة وجبال الأورال في روسيا.

تختلف الأنظمة الجبلية عن بعضها البعض بأبعادها واتساعها وتفصيلها البنيوية والصخرية، ولكنها تتشابه في صفات ومظاهر أساسية يمكن تلخيصها بما يلي:

- ١- تأخذ أشكالاً خطية طولانية أو قوسية، وتتألف من عدد من السلاسل الجبلية المتوازية.

- ٢- تحوي أحزمة من الصخور الرسوبية المشوهة مترافقة مع صخور بركانية وناارية واستحالية، تُقطعها فوالق عكسية، تبدي بمجملها مظاهر انضغاط القشرة الأرضية.

- ٣- لها هندسة داخلية بالغة التعقيد. تتضمن انتقالاً لكتل هائلة من الصخور المختلفة في طبيعتها ومنشئها (منها صخور قارية وصخور قشرة المحيطات) وتعرضها للتشوه الشديد والاستحالة خلال فترة زمنية أقل بكثير من أزمنة تشكل صخورها الرسوبية.

- ٤- تأخذ الصخور الاستحالية فيها أشكال أحزمة متوازية وغير متناظرة، تعكس أنماطاً حرارية متدرجة على إمتداد هذه الأنظمة.

لقد كانت أنظمة الجبال وما زالت موضع كثير من الدراسات التي تتضمن أحياناً الكثير من الجدل والغموض. ولم تتمكن الدراسات الماضية من التوصل لأكثر من تفسير المعطيات المتعلقة بأجزائها السطحية. وقد ساهمت الدراسات الحديثة، بالاعتماد على وسائل التقانة الحديثة، التي شملت دراسات توزع الزلازل وطبيعة قيعان المحيطات في توفير معطيات مهمة عن مواطن تطور الأنظمة الجبلية، ووضع المفاهيم الأساسية حول نشوئها.

## نظريات حول تطور الأنظمة الجبلية

لقد استحوذ تطور أنظمة الجبال وتكونها اهتمام العلماء وكانت موضع كثير من الدراسات التي تضمنت نظريات عديدة أهمها:

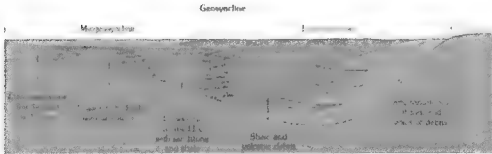
١- نظرية التقلص التي تفترض أن باطن الأرض ينقص حجمه مع مرور الزمن نتيجة التبريد المستمر، الأمر الذي أدى إلى حدوث تقلصات وتجمعات في قشرتها الخارجية نتج منها السلاسل الجبلية. وقد فشلت هذه النظرية في تفسير كثير من الظواهر، مثل وجود هذه الأنظمة على شكل أحزمة طولانية في مناطق محدودة، على الرغم من أنها تفترض تأثير جميع سطح الكرة الأرضية. يضاف إلى ذلك أن قوى الانضغاط الناجمة من التقلص يجب أن تؤدي إلى تشكيل طيات بأشكال مروحية. مع أن معظم الطيات المعروفة تميل باتجاه واحد، والأهم من ذلك أن الحرارة الناجمة من النشاط الإشعاعي والتفاعلات الكيميائية في باطن الأرض كافية لأن تهدم الافتراض الأساسي الذي بنيت عليه هذه النظرية.

## ٢- نظرية المقعرات الجيولوجية

تفترض هذه النظرية أن تطور الجبال قد تم في مقعرات جيولوجية تتراكم فيها رسوبات غزيرة مع هبوط تدريجي في قاعها، يلي ذلك خضوعها إلى حركات جانبية ضاغطة. وكان أول من وضعها الجيولوجي الأمريكي هول Hall عام ١٨٥٠ عندما قام بدراسة الصخور الرسوبية المؤلفة للجزء الشمالي من جبال الأبالاش. فقد استنتج، اعتماداً على المستحاثات الموجودة فيها، بأن سماكة الصخور في هذا الجزء يزيد كثيراً على مثيلاتها في العمر نفسه الموجودة داخل القارة. وإن الصخور الرسوبية الكلسية والرملية المؤلفة لها ووجود علامات التموج والتشققات الطينية، تدل على أن هذا السمك الهائل من الصخور الذي يبلغ نحو (٩٥٠٠) متر، قد تراكم في مياه لا يزيد عمقها على بضعة مئات من الأمتار، لذلك افترض بأنها تراكمت في منخفض رسوبي ضخم يهبط ببطء كافٍ لمواكبة تراكم الرسوبات المستمر، وعرف هذا المنخفض فيما بعد بالمقعر الجيولوجي Geosyncline (شكل ١-٣٩).

ثم جاء دانا عام ١٨٧٣ ليجعل هذه الملاحظة أكثر شمولاً، وأثبت أنها تنطبق على كل جبال الأبالاش، وافترض أيضاً أنه بعد تراكم سماكة كبيرة من الرسوبات تبدأ قوى أفقية موجهة من الجانب البحري للمقعر الجيولوجي على ضغط الرسوبات مما يؤدي إلى تقليص القشرة وزيادة سمكها والتواءها، وبهذا يتشكل نظام جبلي شاهق الارتفاع. وقد وجد الجيولوجيون فيما بعد أنه يمكن تطبيق مبدأ المقعر الجيولوجي على نظم جبلية أخرى.

بالرغم أن نظرية المقعر الجيولوجي قد قدمت بعض المعلومات عن النظم الجبلية الموجودة في العالم، إلا أنها لم تأت بشرح كاف للأسباب الكامنة وراء حركات تكون الجبال، وما هو السبب الذي أدى إلى هبوط قاع المقعر الجيولوجي، إلا أن ظهور وتطور نظرية تكتونية الصفائح plate tectonics مكنت من الإجابة عن كثير من الأسئلة.

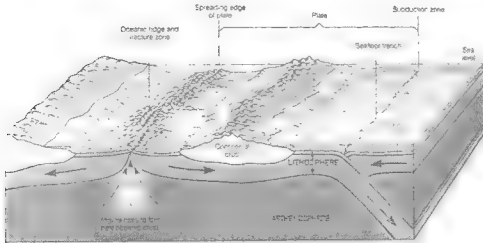


شكل ١١-٣٩: مقطع عرضي في مقعر جيولوجي يوضح تشكل الرسوبات في المياه الضحلة (Eugeosyncline) والرسوبات في المياه العميقة (Mioeogsyncline).

### ٣- نظرية تكتونية الصفائح وتكون الأنظمة الجبلية

ينسب تكون الجبال حسب نظرية تكتونية الصفائح plate tectonics إلى أعراف المحيطات ocean ridges وخنادقها ocean trenches. فصفائح الغلاف الصخري lithosphere plates المولدة من القشرة الأرضية earth's crust والمعطف الأعلى upper mantle، تنمو وتتجدد باستمرار من النشاطات النارية

والاندفاعات البركانية التي يسببها صعود تيارات ساخنة من صخر المعطف عند أعراف المحيطات. وبالمقابل فهي تتخرب وتستهلك بالانغراز subduction عند تصادم بعضها مع بعض على امتداد خنادق المحيطات (شكل ٤٠-١١). وبذلك تتوسع قيعان المحيطات وتحرك صفائح الغلاف الصخري متباعدة بعضها عن بعض على جانبي أعراف المحيطات، حاملة معها القارات. وبما أن صخور القشرة القارية continental crust أقل كثافة من صخور قشرة المحيطات oceanic crust، فهي لا تجبر على الانغراز من جراء التصادم. وعوضاً عن ذلك تتجدد وتزداد سماكتها على امتداد نطاق التصادم. أما قشرة المحيطات فتتهبط وتنغرز تحت القشرة القارية عائدة إلى المعطف، حيث يسبب انصهارها الجزئي نشاطات بركانية في الجانب القاري. ويتشكل من هبوطها خنادق المحيطات، وتصبح هذه الخنادق محالاً للتراكم الرسوبي التخزين فوق أسرطة طولانية هابطة من قشرة الأرض تدعى الأحزمة الحركية mobile belts.



شكل ٤٠-١١: مقطع عرضي في الطبقات الخارجية للأرض، توضح كيف تتحرك المغما من المعطف الأعلى داخل مراكز توسع في قاع المحيط. وتبرد هناك مشكلة قشرة محيطية جديدة. ومن أجل استيعاب المواد الجديدة يتحرك الغلاف الصخري مبتعداً عن عرف المحيط ليغوص وينغرز بشكل تدريجي في المعطف ليمسح فيه ويختلط معه مرة ثانية.



## أماكن الأحزمة الحركية وطبيعتها:

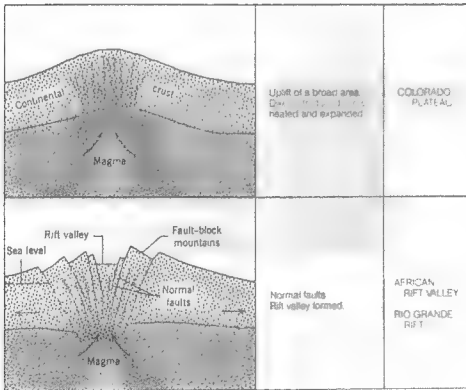
توجد الأحزمة الحركية، التي تتمثل في الأنظمة الجبلية الممتدة على شكل أحزمة طولانية من الصخور الرسوبية والبركانية المشوهة، في نطاقات تصادم صفائح الغلاف الصخري.

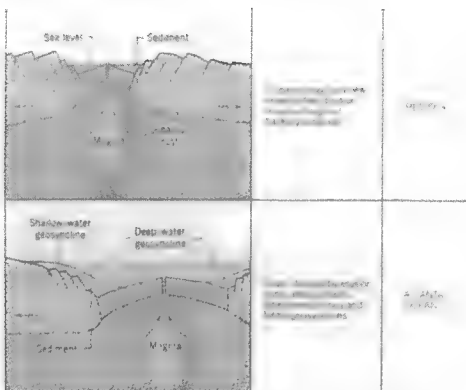
أما التعرف على طبيعتها فيتم من دراسة الأنظمة الجبلية الحالية. ولقد افترض وجود هذه الأحزمة من خلال الدراسات التي أجريت على جبال الأبالاش. فقد لوحظ أن الحزام الحركي لنظام الأبالاش كان خلال فترة من تاريخها مولفاً من جزئين متوازيين، الأول داخلي ويقع فوق الرف القاري حيث يتمثل بصخور كلسية ورملية تتداخل فيها رسوبات رملية إسفينية، معظمها قاري، تزداد سماكتها باتجاه القارة. والثاني خارجي، يقع معظمه فوق قشرة المحيطات وجزئياً فوق الرف القاري، ويتمثل بصخور الغضار والغضار الصفحي، إضافة إلى بعض الحجر الرملي والرمل الغضاري، وأيضاً من صخور بركانية مترافقة مع الصوان. وتتميز الرسوبات في الجزء الداخلي عن مثيلاتها في الجزء الخارجي بالفرز الجيد well sorting الناتج من فعل الأمواج. ويشير الفرز الرديء في رسوبات الجزء الخارجي إلى تفرغ حمولات رسوبية ضخمة في مياه بحرية عميقة وهادئة. أما عمليات الطي folding فهي إجمالاً شديدة في هذا الحزام، وتترافق مع ظواهر القوالب العكسية الكثيفة وكتل التحميل الفالقي thrust blocks، إلا أن مظاهر ازدياد شدتها في الجزء الخارجي من الحزام الحركي تكون واضحة تترافق مع مظاهر الاستحالة. وقد لوحظ أيضاً أن الجزء الخارجي من هذا الحزام الحركي يميز باحتوائه على كتل وشرائع من قشرة المحيطات. وتوجد أمثلة أخرى مماثلة في شرق أمريكا الشمالية وفي أقواس جزر شرقي آسيا وغيرها. ولكي نعلل أسباب طبيعة هذه الرسوبات المولفة للأحزمة الحركية يجب أن نتابع الأحداث الجيولوجية التي تؤدي إلى افتتاح المحيطات ونهوض الأنظمة الجبلية.

## الفتاح المحيطات وتشكل الأعراف المحيطية

حين يصعد تيار ساخن من صخر المعطف نحو أسفل صفيحة قارية من الغلاف

الصخري فإنه يؤدي إلى تقببها وترققها بالتسخين والشد. وينتهي الشد والترقق في الجزء المقيب إلى تصدعه بفوالق عادية وهبوط أجزائه على امتداد هذه الفوالق (شكل ١١-٤١). وتتراكم في الأودية الهابطة منها رسوبات غزيرة تنتج من حت جبال الكتل الصاعدة الموجودة على جانبيها. ومع تتابع هذه الأحداث تتكسر الصفيحة القارية إلى جزئين متباعدين يفصل بينهما عرف محيط جديد. يأخذ هذا المحيط بالتوسع من الانفجاعات البركانية المولدة لقشرة المحيطات التي يسببها الانصهار الجزئي في صخر المعطف الأعلى الساخن المتحرر من الضغط على امتداد التصدع. وهكذا يتطور الجزء الداخلي من الحزام الحركي بالشد والترقق والهبوط على امتداد فوالق عادية على جانبي الصفيحتين القاريتين المتباعدتين (شكل ١١-٤١ ب) ومع استمرار توسع صفيحتي المحيط المتولدتين على جانبي العرف وتصادمهما مع الصفيحتين القاريتين المتباعدتين تهبط قشرة المحيط تحتها وتنغرز في المعطف.

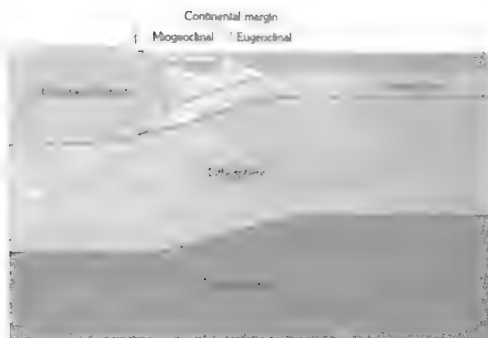




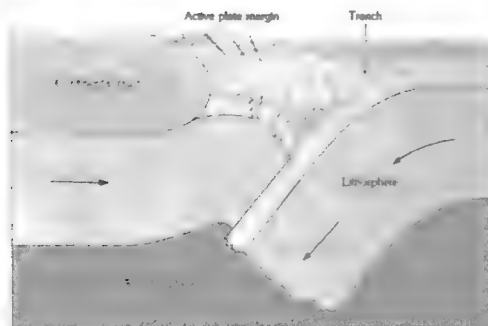
شكل ١١.١: انفتاح المحيطات وتشكل الأعراق المحيطية.

## نهوض أنظمة الجبال:

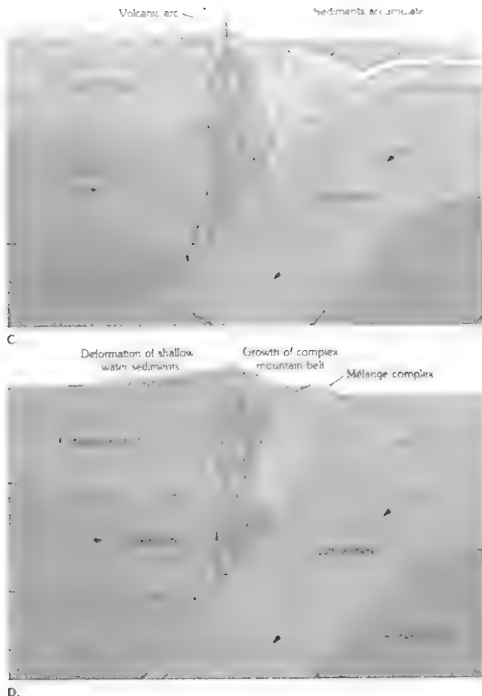
تتميز هوامش تصادم صفائح الغلاف الصخري بأنواع كثيرة من النشاطات من بينها نوعان يأخذان أهمية خاصة في نهوض الجبال. فالنوع الأول نشاط حراري ينجم من انغراز قشرة المحيطات داخل المعطف وارتفاع حرارتها وحدوث الانصهار الجزئي المولد للمagma التي تندفع على السطح بنشاطات بركانية. أما النوع الثاني فهو نشاط ميكانيكي لهبوط قشرة المحيطات وانغرازها يؤدي إلى تعمق رسوبات المقعر الجيولوجي وانضغاطها وتشوهها بالطي والقوالق العكسية والاستحالة، مما يؤدي تدريجياً إلى نهوضها على شكل أنظمة جبلية (شكل ١١-٤٢).



A.



B.



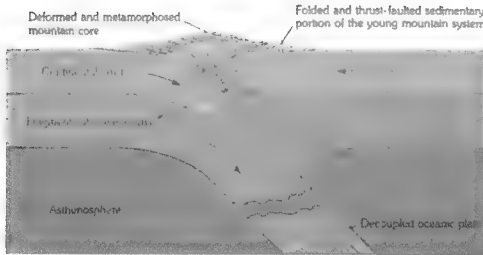
D.

شكل ١١-١: رسم يوضح مراحل تطور الأنظمة الجبلية بنتيجة تصادم صفيحة محيطية مع صفيحة قارية.  
 A - تصادم صفيحة قارية مع صفيحة محيطية. ويوضح الشكل أيضا رسوبيات المقعر الجيولوجي.  
 B - أدى تصادم الصفيحتين إلى انغراز القشرة المحيطية تحت القشرة القارية، وإلى تعمق رسوبيات المقعر الجيولوجي ونقلها إلى الحالة القارية وانضغاطها وتشوهها بالظني واللواقي.  
 C - أدى انغراز الصفيحة المحيطية في المعطف إلى انصهارها جزئيا وتشكل ماخضا انديزيتية تندلع إلى سطح الأرض، مع استمرار تعمق للرسوبيات وتشوهها بالظني والتصدع.  
 D - يؤدي استمرار تعمق الرسوبيات إلى انصهارها وتشكل كتل من البازوليت الغرانيتية مشحلة لب الأنظمة الجبلية، وتخضع الرسوبيات إلى استحالة تحت ضغط مرتفع وحرارة منخفضة وتغطي سحاة للشميت الأرقق لما الأجزاء للصيقة لتغطي سحاة القليلين.

وفي العودة إلى تطور المحيطات الحالية، فإن المحيط الأطلسي لا يزال في طور التوسع وبالتالي يزداد عمق دفن الرسوبات المتراكمة في مقعراته الجيولوجية، على امتداد حدوده القارية. لقد بدأ تطور هذه المقعرات على امتداد الشواطئ الشرقية لأمريكا الشمالية منذ نحو (٢٠٠) مليون سنة، إلا أن تطورها على امتداد الشواطئ الشرقية لأمريكا الجنوبية كان متأخراً، لأن انفتاح المحيط الأطلسي كان يتقدم تدريجياً من الشمال إلى الجنوب. وبما أن هبوط قشرة المحيطات تحت هذه المقعرات يشد رسوباتها نحو الأسفل كما يدفع بها إلى الحافة القارية ويجعلها عرضة للتشوه، فإن الأجزاء العميقة من هذه الرسوبات تخضع تدريجياً للاستحالة وتعطي أنواعاً من صخور الشيست والغنايس. ومع ازدياد التسخين في الصخور القارية العميقة يحصل انصهار جزئي تتولد منه مغعات ريويتية تصعد ببطء نحو الأعلى بسبب لزوجتها العالية ولا تلبث أن تتصلب داخل الصخور التي تغزوها على شكل ديسسات باتوليتية ضخمة. فالتشوهات الأعظمية والاستحالة والانصهار والتهوض الأعظمي هي التي تشكل لب النظام الجبلي الذي يتطابق مع أعمق أجزاء المقعر الجيولوجي. أما الرسوبات فوق الرف القاري فتتضغط وتنحسر بين كتلة القارة وكتلة الصخور العميقة الناهضة فتتطوي وتشوه وتنهض أيضاً لتشكل الجبال الهامشية من النظام الجبلي الجديد. وتوجد في كثير من أنحاء العالم أجزاء من صفائح الغلاف الصخري منفردة تحت صفائح متصادمة معها، كما توجد أنظمة جبلية في طور النهوض نذكر منها جبال الأنديز في شرق أمريكا الجنوبية، فصفيحة المحيط المنفرزة هي صفيحة نازكا Nazca والصفيحة القارية المتصادمة معها هي أمريكا الجنوبية، وحنديق المحيط فوق نطاق الانغراز هو حنديق البيرو - تشيلي (شكل ١٤-٣)، والنظام الجبلي الناهض هو جبال الأنديز التي تنتشر فيها النشاطات البركانية. ويُعتقد أن هذه النشاطات البركانية التي تحدث باستمرار على الجانب القاري من التصادم تقوم بدور رئيس في تطور هذا النظام الجبلي.

أما جبال الهيمالايا والألب التي تعد من أشهر الأنظمة الجبلية في العالم فتمتيز بنهوض شديد وتضاريس حادة وخرى شاهقة ووقوعها داخل القارات. ويعود نهوضها إلى تصادم صفائح قارية، فجبال الهيمالايا نهضت من تصادم صفيحة

القارة الهندية مع كتلة التبت الآسيوية، كما نهضت جبال الألب من تصادم صفيحة القارة الأفريقية مع الصفيحة الأوربية، وأدى ذلك إلى انغلاق محيط التبتس القديم. وأثناء الإنغلاق تعرضت كميات هائلة من الرسوبات إلى ضغوط عالية أدت إلى التوائها مشكلة طيات مسطحة امتدت لمسافات كبيرة في اتجاه الشمال على شكل غطاءات تحميل ضخمة. وقد انطوت داخل هذه الرواسب قطع مكسرة من القشرة المحيطية على طول نطاق تصادم الكتلتين (شكل ١١-٤٣).

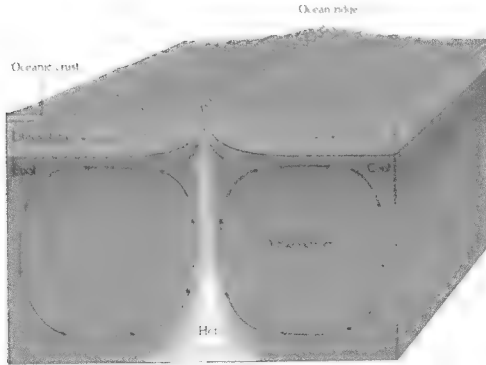


شكل ١١-٤٣: رسم يوضح تشكل جبال الألب من تصادم صفيحتين آريتين. ويوضح الشكل قطع قشرة محيطية مكسرة على طول للتحام الكتلتين.

أما جبال الأبالاش التي عاصرت في نهوضها جبلاً تقع حالياً في غربي أوروبا. فيعتقد أن تطورها كان في مقر جيولوجي يتبع محيط أطلسي أقدم من الحالي بوضع مئات من ملايين السنين، حين تحركت صفيحة القارة الأوربية لتتصادم مع أمريكا الشمالية، وأدى هذا التصادم إلى نهوض نظام جبلي في قارة البانجيا القديمة. ثم انفصلت جبال الأبالاش عن جبال غربي أوروبا حين تكسرت هذه القارة القديمة

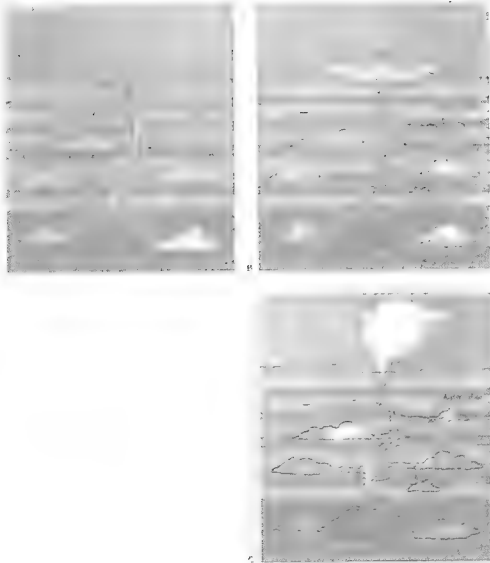
وتباعدت أجزاؤها، ويعتقد أيضاً أن أنظمة جبلية قديمة تقع داخل القارة الآسيوية، كجبال الأورال التي تعود تشكيلاتها الرسوبية إلى أزمنة الباليوزوي قد نهضت من تصادمات قارية مماثلة.

وتعطي ملاحظات الدروع القارية القديمة دلائل تشير إلى إحتوائها على أنظمة جبلية غابرة أقدم بكثير من الباليوزوي. ولهذا يعتقد العلماء أن حركات صفائح الغلاف الصخري كانت تجري منذ أقدم الأزمنة الجيولوجية وأدت إلى التحام الكتل القارية وانفصالها مرات متعددة. وأخيراً لا بد من القول، بدون تأكيد، إن هذه الحركات تتبع مراحل تاريخية متعاقبة، بحيث تنتهي كل واحدة منها بتشكيل خلايا جديدة من تيارات الحملان داخل المعطف نتيجة التوزع غير المتساوي للحرارة في أعماق الأرض، وهو كما يعتقد دافع رئيس لتكسر الغلاف الصخري وتحرك أجزائه الصفيفية (شكل ١١-٤٤).



شكل ١١-٤٤: يوضح تيارات الحملان وتكسر الغلاف الصخري.

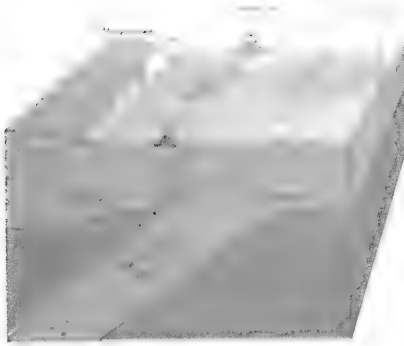




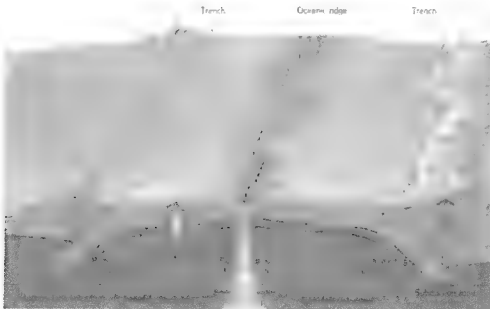
شكل ٤-١٦: رسم نمونجي للجزر: A - مرحلة تجمع المياه الجوفية في تجويف ومراكز عمودية.  
 B - تسخين المياه بواسطة الصخور القارية الحارة يؤدي إلى تمددها  
 وتسببها على السطح.  
 C - تسبب المياه على السطح أدى إلى انخفاض الضغط عند القاع وحدث  
 الظلم، والانفراج على هيئة بخار مما يسبب في فورانها وتفتورها.



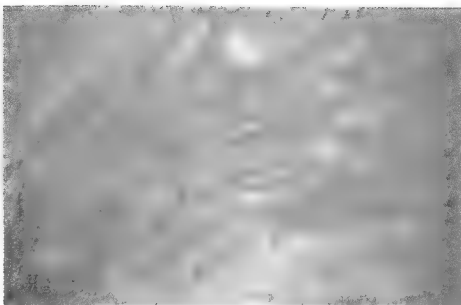
شكل ١١-٩: توزيع الأحزمة الرئيسية للزلازل على سطح الكرة الأرضية  
 a - أحزمة الزلازل الضحلة  
 b - أحزمة الزلازل العميقة.



شكل ٩-١٣: نطاق بينوف وتوزع البؤر الزلزالية.



شكل ٩-١٠: مقطع في القاع الصخري يوضح البركة على امتداد أنظمة أحراف المحيطات ونطاقات الانغراس.



شكل ١١-٥: تشوه على نطاق واسع يُظهر بنية البوديناج.  
تمثل القطع المتطاوله الصخور القاسية، وبينها الصخور اللينة.

# الفصل الثاني عشر

## تطبيقات الجيولوجيا

### المواد المفيدة والطاقة

بحثنا سابقاً في الفلزات والصخور، وفي العمليات الجيولوجية، والأشكال التضاريسية الناجمة عنها. وبهذا يكون لدينا معلومات مفصلة ووافية عن المواد والعمليات التي يعتمد عليها علم الجيولوجيا. ولكن يبقّى علينا أن نعرف ما هي الفائدة العملية التي نحصل عليها من هذه المعلومات، وما هي صلتها بالموضوعات والنشاطات التي نهتم بها في حياتنا اليومية.

تتطلب الحضارة الحديثة مقداراً كبيراً من المواد، وكميات ضخمة من الطاقة، والطبيعة تنتج هذه المواد والطاقة عن طريق العمليات الجيولوجية التي نحن بصدددها.

#### المواد Materials

يمكن تقسيم المواد التي تستعمل في يومنا الحاضر الى قسمين:

أ- المعادن **Metals**: مثل الألمنيوم، النحاس، الذهب، الحديد، الفضة، القصدير، البلاتين، الكروم، النيكل، الرصاص، التوتياء.

ب- اللامعادن **Non - metals**: مثل المساس، الملح، الحجر الكلسي، الغضار،

الصخور الفوسفاتية، الاسبتوس (الاميات).

وهذه المواد يمكن ان توجد بأشكال وكميات مختلفة في كل مكان، ولكن عندما توجد بكميات وتجمعات وفيرة يمكن تعدينها والاستفادة منها وتعرف بالتوضعات الفلزية **mineral deposits**.

والطريقة الملائمة للبحث عن التوضعات الفلزية هي أن تصنف على اساس العمليات الجيولوجية التي أوجدتها مثل: النشاط الناري والتجوية والترسيب.

## التركيز بالنشاط الناري

ذكرنا سابقاً ان الصخور النارية تتكون من خليط من العناصر في محلول يدعى المغما أو المهل. وبعض المغما يحتوي على عناصر لا تتحد مع الفلزات المكونة للصخور لكون حجوم شواردها. وأحياناً أخرى تتبلور هذه العناصر في مرحلة مبكرة من تبلور المغما وتنفصل عن المحلول. وفي بعض المرات تتشكل مؤخراً وتحتبس في المغما المتبلورة. وغالباً تبقى ممزوجة مع المواد الطيارة الساخنة بما فيها الماء، وتحقن في الصخور المحيطة.

## التركيز الفلزي **mineral concentraion**

أ - الماس **Diamond**: فلز مؤلف من عنصر الكربون، وهو أكثر الفلزات ندرة بين الاحجار الكريمة، ويقع في قمة الفلزات المفيدة من حيث القيمة الاقتصادية. ويتصف بقساوته العالية، حيث يستعمل كثيراً في الصناعة في آلات القطع والسحق، كما يتصف بقرينة انكساره العالية التي تجعل بلوراته تتألق بانعكاسات ضوئية جميلة جداً. وكلما زادت شفافية بلوراته، زادت قيمته الاقتصادية.

ويتشكل الماس في المغما حين يكون الكربون محتسباً فيها تحت ضغط هائل. لذلك لا نتوقع ان نجد الماس في أماكن لم تتوفر فيها هذه الشروط.

وأشهر توضعات الماس تقع في مداخن بركانية قديمة تحوي صخور الكمبرليت، في جنوب افريقيا، وهي صخور فوق أساسية بهيدلوتيتية غنية بالاوليفين، ويوجد فيها الماس على شكل حبيبات مشتتة. وتأخذ الصخور شكل أنابيب تضيق باتجاه الاسفل، وتدعى انابيب الكمبرليت، تنلس ضمن صخور قديمة تعود الى ما قبل الكمبري. وغالباً ما تظهر آثار التجوية في أجزائها العلوية.

## ب - البلاتين والنيكل والكروم

توجد توضعات البلاتين في صخور فوق أساسية، وبخاصة التي تحتوي على توضعات النيكل والكروم. ومن الواضح أنها تشكلت في المراحل الأولى من تبلور المغما، ولكنها أثقل الفلزات فهي تستقر في أسفلها. ويوجد البلاتين في حالة حرة، اما توضعات النيكل والكروم فتوجد على شكل مركبات متحدة مع عناصر أخرى.

البلاتين: يوجد البلاتين في توضعاته اما بحالة حرة او ضمن خلاط معدنية مثل بلاتينيريديم  $\text{Platiniridium}$ ، وقد يوجد أحياناً في مركبات فلزية أهمها السبيريليت  $(\text{Pt As}_2)$  Sperrylite.

تعتمد أهمية البلاتين الصناعية على درجة انصهاره العالية (١٧٥٥° مئوية) ومقاومته للعوامل الكيميائية. هذه الخواص تجعله مفيداً في الادوات المخبرية، وفي نقاط تماس القاطعات الكهربائية، وفي صناعة الاسنان وفي التصوير، وأخيراً في صناعة الحلي.

النيكل: بالرغم من ان النيكل عنصر نادر نسبياً، فهو ذو أهمية كبيرة في الصناعة الحديثة، إذ يستعمل في تصنيع الخلاط القوية والخشنة مثل الفولاذ النيكلني  $\text{Monel}$  (٦٨٪ نيكل و ٢٨٪ نحاس) (٣،٥٪ من النيكل). وفي تحضير المونيل  $\text{Monel}$  (٦٨٪ نيكل و ٢٨٪ نحاس) (٤٪ من المعادن الأخرى). ويستعمل أيضاً في عمليات الطلاء المختلفة وفي صك العملات، وأخيراً يستخدم في صنع نوابض الساعات لتمدده المنخفض.

يعد فلز البنتلانديت  $[\text{Fe, Ni}]_9 \text{S}_{81}$  Pentlandite [فلز الخام الرئيس للنيكل، وتقع أشهر توضعاته في سادبوري وأونتاريو.

**الكروم:** يعد الكروميت Chromite الفلز الرئيسي للكروم، اذ يتألف من ٦٨٪ من اوكسيد الكروم  $Cr_2O_3$  و ٣٢٪ من  $FeO$ . وتعد الولايات المتحدة اول دولة منتجة للكروم عام ١٨٦٠ من شاستا وكاليفورنيا، ولكن اليوم تعد روسيا الدولة الاولى المنتجة له.

يستعمل الكروم بشكل رئيس لتكوين الخلاط مع الفولاذ، حيث يعطي خلاطه صلابة وقساوة ومثانة مرتفعة، اضافة إلى مقاومته للتأكسد والتآكل والبري، وللمواد الكيميائية والكهرباء والحرارة. وتعتمد صناعة الآلات الميكانيكية والسيارات والطائرات والقطارات كثيراً على خلاط فولاذ الكروم. ويستعمل هذا المعدن أيضاً في طلاء المنتجات المعدنية، وفي صناعة الأصبغة والمواد الكيميائية المزيلة للالوان. كما يستفاد منه كعامل مؤكسد.

### جـ - الذهب والنحاس والتصدير

تتوضع هذه المعادن من المحاليل الهيدروترمالية التي تحقن في الصخور المحيطة بالمagma.

**الذهب:** عرف الذهب منذ القديم كمعدن ثمين واستعمل في أغراض التزين، وصناعة الحلبي وصك النقود. وان اول ارتفاع عالمي في انتاج الذهب حدث حين اكتشاف القارة الامريكية، حين بدأت عواصم الدول الاوربية تفتني بهذا المعدن المكتشف. وقد أصبحت الولايات المتحدة أول الدول المنتجة للذهب منذ عام ١٨٠١ ثم تبع ذلك اكتشافه في استراليا وجنوب افريقيا.

توجد توضعات الذهب في مناطق النشاط الديسي، بخاصة المعطي للصخور النارية المتوسطة الحمضية. ويوجد في معظم الأحوال بحالة حرة ونادراً ما يكون نقياً، حيث تحالطه عناصر معدنية أخرى أهمها الفضة. وأحياناً يوجد ضمن مركبات فلزية ناجمة من اتحاداته مع عنصر التيلوريوم وتسمى بتيلوريدات الذهب Gold tilurides أو ضمن محاليل صلبة معدنية.

يتم استخلاص الذهب الحر بالطحن، فالملغمة، ثم التنقية بالتحليل الكهربائي،



وحين يترافق مع الكباريت يصار إلى شي الكباريت ثم استخلاص الذهب منها.

النحاس: توجد توضعات النحاس في الطبيعة في حالة حرة أو ضمن مركبات فلزية منها كبريت معدنية، ومنها أكاسيد، ومنها كربونات أو كبريتات أو سيليكات أو كلوريدات. ويوجد في الطبيعة نحو ١٥٦ فلزاً معروفاً يدخل في تركيبها النحاس، إلا أن الفلزات الرئيسة لهذا المعدن هي الكالكوبيريت  $Cu Fe S_2$  والبورنيت  $Cu_5 FeS_4$  والكالكوسيت  $Cu_2S$ .

إن أغلب توضعات النحاس الهامة، قد نشأت من محاليل هيدروترمالية مع سيطرة الاستعاضة على ملء الفراغات، إلا أن توضعات الكالكوسيت، تكون عادة نتيجة اغناء كبريتي لاحق.

يأتي النحاس بالدرجة الثانية بعد الحديد من بين المعادن الرئيسية التي يعتمد عليها في الصناعة. وبخاصة في صناعة اللوازم الكهربائية (أسلاك، نواقل، ملفات أدوات متنوعة)، كما يستهلك جزء كبير منه في صناعة الذخائر الحربية، والأدوات المنزلية.

ومن أهم خلاصط النحاس نذكر: البرونز، ويتألف من ٨٨٪ نحاس و ١٠٪ قصدير و ٢٪ توتياء، والصفر ويتألف من خليطة من نحاس وتوتياء تتراوح فيها نسبة النحاس بين ٩٩-٥٥٪، والفضة الألمانية هي خليطة من النحاس والتوتياء والنيكل.

القصدير: إن الانماط الرئيسية الجيدة لتوضعات القصدير، المستمرة في العالم، تعود في منشئها إلى النشاط الهيدروترموالي المائي للفراغات. ويعتقد أن القصدير قد نقل من المهل بحالة غازية، على شكل كلور القصدير أو فلور القصدير، اللذين يمكن أن يعطيا فلزات الكاسيتريت بتفاعلها مع الماء. ويدل على النشاط الهيدروترموالي، مرافقة هذه التوضعات لصخور الغرانيت، وفساد الجدران الغرانيتية الملامسة لها. وإن ٧٥٪ من قصدير العالم يعود في منشئه إلى التركيز الميكانيكي.

يعد الكاسيتريت  $Cassiterite$  الفلز الخام الوحيد للقصدير، ويرافقه شوائب من الكوارتز والبيريت والماركاسيت.

يستعمل القصدير في طلاء المعادن لحمايتها من الصدأ، وفي صناعة خلاط الصفر والبرونز وفي مواد اللحام، وفي صناعة الصفائح الرقيقة و صفيح المعلبات، وفي صناعة بعض أنواع أنابيب التمديدات وفي الصناعة الكيميائية.

#### د - توضعات الرصاص والتوتياء:

بالرغم من عدم التشابه في الصفات الكيميائية لهذين المعدنين، فإنه يوجد ارتباط جيولوجي بينهما، ناجم من ترافق فلزات هذين المعدنين في التوضعات نفسها، بخاصة كبريتهما (الغالينا والسفاليريت).

إن أكثر توضعات الرصاص - توتياء قد نشأت من نشاط هيدروترمالي مالى للفراغات، أو استعاضة تماسية داخل الصخور الكربونائية الكلسية والدولوميتية. وتعد مراحل هذا النشاط بصورة عامة مراحل منخفضة الحرارة، حيث تستبدل بعض مركبات الصخور المحيطة المغما بحامات الرصاص والتوتياء، وتحصل الاستعاضة بخاصة في الصخور الكلسية.

يستعمل الرصاص في صناعة أحرف الطباعة، وفي حماية التمديدات الكهربائية وأنابيب تمديدات المياه والغاز. والصفائح المعدنية الرقيقة و صفائح المدخرات. أما التوتياء فتستعمل في بعض الخلاط وفي صناعة البطاريات وفي طلاء المعادن.

### التركيز بالتجوية

#### Concentration by Weatehring

لقد عرفنا سابقاً التجوية بأنها مجموعة عمليات جيولوجية تؤدي إلى تحطيم الصخور، وتشكيل مواد منحلة ومواد متبقية. وهنا نركز في مجال دراستنا لتشكيل التوضعات الفلزية على المواد المتبقية التي يمكن أن نصنفها إلى:

##### ١- مواد متبقية:

ويمكن أن تكون:

١- مواد متبقية على شكل ترب عادية ليس لها أهمية اقتصادية.

ب - مواد متبقية تتركز فيها فلزات مفيدة تعرف بتوضعات التركيز المتبقي **residual concentration deposits**، حيث يتشكل بعضها بنتيجة التحوية الكيميائية للصخور المحتوية على الفلزات الصفاحية، مثل تراكم أكاسيد الألمنيوم المائية (البوكسيت) من تجوية صخور السيانيت بشروط مناخية حارة ورطبة. ويعد البوكسيت المصدر الرئيس لمعدن الألمنيوم. وتوجد التوضعات الرئيسة له في ولاية أركنساس الأمريكية.

إن الألمنيوم هو آخر المعادن المكتشفة بالرغم من وجوده بكثرة في صخور القشرة الأرضية، ولكن صعوبة استخلاصه من فلزاته لم تقلل إلا في نهاية القرن التاسع عشر، لذلك يطلق عليه اسم معدن القرن العشرين.

والألمنيوم معدن خفيف ومقاوم للعوامل الجوية بالإضافة إلى ناقلية الجيدة. إن صفاته هذه هي التي أعطت مكانته الصناعية فهو يستعمل في الصناعات كافة مثل أدوات المطبخ، والمفروشات، والطائرات، والقطارات وفي النواقل الكهربائية.

وتتشكل بعض توضعات التركيز المتبقي نتيجة تخلص المواد المفيدة من الشوائب والمركبات الأخرى المرافقة لها، وهذا ما يجعلها أكثر تركيزاً من السابق. فمثلاً يؤدي انحلال الصخور الكلسية التي تحتوي على أكاسيد حديد إلى تركيز هذه الأكاسيد في أمكنة الانحلال. وقد يصل هذا التركيز إلى تشكل توضعات حديدية مفيدة. وكذلك تجوية الصخور النارية الأساسية، في المناطق المدارية وتحت المدارية، تعطي تربة لاتيريتية غنية بأكاسيد الحديد. وأيضاً تجوية عروق أو صخور تحوي السيليريت أو كبريت الحديد، يؤدي إلى اغنائها بأكاسيد الحديد وتشكل توضعات هامة للحديد.

## ٢- محاليل متبقية

ويمكن أن تترسب تحت سطح الأرض على شكل توضعات أكاسيدية، أو تتفاعل مع توضعات الكبريت المعدنية مودبة إلى اغنائها، وهي ما يسمى توضعات

الأكسدة والاغناء الكباريتي اللاحق.

توكسد المياه السطحية عدداً كبيراً من فلزات التوضعات المعدنية، وبخاصة الكباريت المعدنية، وتقلها نحو الاسفل على شكل كبريتات منحلّة، يمكن أن يتوضع جزء منها ضمن نطاق الأكسدة تحت تأثيرات كيميائية مختلفة، مما يؤدي إلى تراكم هذه المواد وتشكل توضعات أكاسيدية. وحين تنضم هذه المحاليل إلى الماء الجوي، فإنها تخضع لتفاعلات كيميائية بوسط يفتقر إلى الأكسجين، وينتج منها توضع كباريت معدنية مفيدة تراكم أسفل منسوب الماء الجوي، ضمن نطاق يدعى بنطاق الاغناء الكباريتي اللاحق.

### التركيز بعمليات ترسيبية

تنقل المياه الجارية كميات كبيرة من المواد الفلزية في أقنية وجداول وبخاصة في المناطق الجبلية. وتميل الفلزات المعدنية الثقيلة إلى التكدس في مجاري هذه المياه على شكل ترسبات تدعى بالتوضعات المكثبة placer deposits وقد استعملت كلمة مكث placer في البداية من أجل تمييز توضعات الذهب الرسوبية.

وتشمل عملية التركيز هذه مرحلتين: الأولى ويتم بها تحرير الفلزات المقاومة للفساد بعوامل التجوية، والثانية يتم بها تركيز هذه الفلزات بعمليات النقل.

تحرر التجوية الذهب من الصخور والعروق الأولية التي تحوي عليه. وان قابليته للطرق والسحب تحميه من السحق. بالإضافة إلى أن وزنه النوعي المرتفع (١٩-١٥) يؤدي إلى ترسيبه بسرعة في قاع المجرى المائي.

اكتشف الذهب على شكل توضعات مكثبة عام ١٨٤٨، في المنحدرات الغربية، لجبال السورانيقادا في كاليفورنيا، وكان ذلك بكميات ضخمة. ويتم تخليص الذهب من الشوائب المرافقة بعملية تصويل عادية. أما في التوضعات المكثبة الفقيرة نسبياً فيستخلص بطرائق هيدروليكية Hydrauliclicking، حيث يطبق على التوضع تيار مائي قوي يجرف معه الحامات، ليسر بها إلى قناة منحدرة، ذات

مصائد اصطناعية ترسب عندها الفلزات المرغوبة، وتخرج الشوائب من نهاية هذه القناة.

وهناك طريقة آلية لجرف رواسب تحت مائية، حيث يتم استخراج الذهب بواسطة كراكات Dredges مؤلفة من محارف دورانية ميكانيكية، توصل إلى آلات ضخ وتصويل. وتحفر الكراكة تحت الماء لتفرز المواد المفيدة في داخلها، وتلقي بالنفايات في الطرف المقابل من الحفرة.

إن أضخم ثروات الذهب في العالم موجودة في توضعات ويت ووتر سراند Witwatersrand في جنوب افريقيا، وتقع على هضبة تقع على ارتفاع ٦٠٠٠ قدم فوق منسوب سطح البحر وعلى بعد ٥٠٠ ميل شرق مدينة الكاب. ان كلمة ويت ووتر سراند تعني الأرض البيضاء المرتفعة، وسميت بذلك لانها مشهورة بصخور الكوارتزيت البيضاء التي تقاوم التحوية حيث تنتصب واقفة على حافة الماء.

توجد التوضعات في هذه المنطقة ضمن طبقات رقيقة من الصخور التجمعية المؤلفة من كوارتز معاد تبلوره، وسيريسيت وكلوريت وتورمالين وكالسيت، وذهب على شكل حبيبات ناعمة (١٠،٧-١٠٠م)، اضافة إلى عروق صغيرة من الذهب غمر من الملاط إلى حبيبات الكوارتز التجمعية.

ويعتقد بعض الجيولوجيين أنها تشكلت من توضعات مكثبة قدمة، بينما يعتقد آخرون أنها تشكلت نتيجة انحراق الصخور الأصلية بمحاليل هيدروترمالية حاملة للذهب. ويمثل انتاج هذه المنطقة ٤٠٪ من الانتاج العالمي.

وكذلك فإن ٧٥٪ من قصدير العالم يأتي من توضعات مكثبة لفلز الكاسيتيريت Cassiterite ( $\text{SnO}_2$ ) أو ثاني أكسيد القصدير ذي الوزن النوعي المرتفع (٧).

إن أضخم ثروات الحديد في العالم قد تشكلت بعمليات الترسيب. وتعد رسوبات الحديد هذه مكامن ذات قيمة اقتصادية، ويمكن أن تزيد عمليات التحوية في تركيزها. فمثلاً في منطقة ليك سوبريور Lake Superior، يتألف النطاق

الذي لم يغسل بعمليات التجهية من تاكونيت، (نسبة الحديد فيه حوالي ٢٥٪). وبالمقابل فإن معظم الحديد المستثمر قد تأكسد إلى هيماتيت، حيث يعطى فلزاً خاماً نسبة الحديد فيه ٥٠ - ٦٠٪، وذلك في المناطق التي خضعت لعمليات غسل.

وهناك توضعات حديد رسوبية تعود للدور السيلوري تعرف بخامات كلينتون Clinton ores تمتد في ولايات ويسكونسين ونيويورك وألاباما الأمريكية. وتتصف الخامات الأولية لهذه التوضعات بتماسكها واحتوائها على نسب لا بأس بها من كربونات الكلسيوم، وتراوح نسبة الحديد فيها بين ٣٥ - ٣٨٪. أما الخامات الواقعة في أماكن سطحية غسلت بالمياه فتصبح غير متماسكة، فقيرة بالكلس وغنية بالحديد بنسبة تتراوح بين ٥٠ - ٦٠٪.

## التركيب الأصلي للصخور

### Original Rock Formation

نحصل على كثير من المواد المفيدة مباشرة من الصخور الأصلية، دون أن يطرأ عليها عمليات تركيز أو اغناء لاحق. فالحجارة مثلاً استعملت منذ عدة قرون كمواد للبناء، ولم تظهر أهميتها بشكل هائل إلا في النصف الثاني من هذا القرن، وذلك باكتشاف طرائق فنية جديدة لاستخلاصها من الأرض بواسطة التفجير، أو قطعها في أحجام قابلة للاستعمال.

وتأخذ بعض الصخور قيمة تجارية لخواصها الكيميائية. فمثلاً الصخور الكلسية، تستعمل لفصل الحمض في عمليات تصنيع السكر، كذلك في تزويد النباتات بالكلسيوم. وتستعمل أيضاً في صناعة الاسمنت، مثل الاسمنت البورتلاندي الذي يتألف من ٧٥٪ من كربونات الكلسيوم و١٣٪ من السيليكا و٥٪ من أكسيد الألمنيوم.

### الصخور الفوسفاتية

وهو اصطلاح شائع يستعمل لصخور رسوبية تحتوي على نسبة عالية من المادة

الفوسفاتية وعاصمة فلز الاباتيت  $(\text{Cl}_2\text{F}_2\text{OH})_3\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$ ، بالإضافة إلى الشوائب الكلسية والغضارية والسيليسية وبعض المواد العضوية. وتستخدم الفوسفات بالدرجة الأولى في تسميد التربة.

توجد الصخور الفوسفاتية بكميات ضخمة في أمريكا حيث تقدر الكميات الموجودة في جبال الروكي بـ ٦ ملايين طن تكفي لعدة قرون. ويوجد أيضاً احتياطات أخرى بكميات كبيرة متوافرة في كثير من أنحاء العالم.

أما الفوسفات السورية فتوجد ضمن تشكيلات تابعة للكريتاسي الأعلى والايوسين، وتأخذ هذه الرسوبات أهميتها الاقتصادية في المناطق الواقعة على منحدرات الجزء الجنوبي من السلسلة التدمرية، وفي منطقة الحماد السورية.

### الاسبستوس Asbestos

وهو فلز ليفي حريري مرن يوجد في الصخور الاستحالية. إن أهم أنواع الاسبستوس التجارية هي الكريزوتيل  $[\text{Mg}_6(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})^2]$  Chrysotile أو الاسبستوس الأزرق. والكروسيڨوليت  $[\text{Na}_3 \text{Mg}_4 \text{Al}(\text{Si}_8 \text{O}_{22})(\text{OH.F})^2]$  Cricidolite وتمتاز هذه الأنواع بطول أليافها ونعومتها ومرونتها وقابليتها الجيدة للفزل والنسيج، وهي تقاوم الحرارة وفعل الحموض وعازلة للكهرباء والحرارة، لذلك تصنع منها أنسجة وحبال وفتائل حرارية وكيميائية وكهربائية.

### الصخور الملحية

الملح أكثر المواد وجوداً في العالم، ويتشكل نتيجة تبخر المياه البحرية ويكون مرافقاً للخصص، وتتراوح سماكة طبقاته بين بضعة أقدام إلى بضعة عشرات من الأقدام. أما في القباب الملحية فتصل سماكة طبقاته إلى ألوف من الأمتار. ومع أن شكل وتاريخ القباب الملحية يختلف من مكان لآخر، لكنها جميعها تميل إلى أخذ الشكل الاسطواني.

## مصادر الطاقة المتوفرة اليوم

نستطيع بمعلوماتنا الحالية أن نحدد بعض مصادر الطاقة التي عرفها الإنسان منذ القديم كالفحم والبترول والغاز الطبيعي. وهذه المواد لا يمكن الاستفادة منها ما لم تكن قد مرت بعمليات تركيز جيولوجية مختلفة. أما الطاقة المتولدة منها فتدعى بالطاقة الكيميائية.

### الطاقة الكيميائية

لقد كان اكتشاف النار واستعمالاتها أول خطوات الإنسان عبر طريق الحضارة، وما زالت حتى يومنا هذا تخدم أسس الحضارة. فالنار هي النمط الاشتعالي في حادثة الأكسدة، حيث يتحد الأوكسجين كيميائياً بالكربون وغيره من عناصر المواد العضوية ليعطي الحرارة والضوء. وإن الفحم والبترول والغاز هي أكثر قابلية للاحتراق والاشتعال بالمقارنة مع المواد الأخرى. تتشكل هذه المواد من تنفس المواد العضوية بمعزل عن الهواء، حيث تطرد منها المركبات الأقل قابلية للاحتراق وتتركز فيها العناصر الأكثر قابلية للاحتراق: الكربون والأوكسجين والهيدروجين. فعندما تحرق المواد العضوية تتحرر كميات كبيرة من الطاقة الكيميائية على شكل طاقة حرارية، يمكن استخدامها مباشرة أو تحويلها إلى أشكال أخرى من الطاقة كالطاقة الكهربائية.

### الفحم الحجري

هو الناتج النهائي لتفحم المواد النباتية المتراكمة في أراضٍ مستنقعية منذ ملايين السنين. ويعتمد حجم وسماكة طبقات الفحم على طبيعة المستنقع كبيئة للتشكل من جهة، وعلى كمية المواد النباتية المتراكمة من جهة ثانية.

تتميز الأنواع المختلفة للفحم الحجري حسب نسبة الكربون المثبت فيها والتي تتناسب طردياً مع درجة التفحم. وأول مراحل تفحم البقايا النباتية يتمثل بالتورب، حيث تبلغ نسبة الكربون المثبت فيه إلى ٦٠٪. بينما تصل في أكثر أنواع الفحم الحجري جودة (الانتراسيت) إلى نحو ٩٥ - ٩٨٪. ويوجد بالإضافة إلى عنصر



الكربون في الأنواع المختلفة للفحم الحجري، عناصر أخرى تبلغ نسبتها حوالي أقل من ١٪ كالصوديوم والبوتاسيوم والكلسيوم والالمنيوم والسيليسيوم والحديد والتيتانيوم وبنسب أقل حوالي ٠,٠١٪ من الليتيوم والروبيديوم والكروم والكوبالت والنحاس والفاليوم والجرمانيوم والنيكل والتفتستين والزركون والنتانوم.

تعتبر بعض أنواع الفحم الحجري مناسبة للتقطير وإنتاج فحم الكوك، الذي تعتمد عليه صناعة الحديد والصلب، ومثلها الفحم الحجري Bituminous coal وتصل نسبة ما تستهلكه هذه الصناعة من إنتاج الفحم الحجري السنوي في العالم إلى الربع. وتعود أهمية فحم الكوك الصناعية إلى استخدامه كمصدر حراري وفي أرجاء خامات الحديد الأكاسيدية.

### التقيب عن الفحم الحجري

ويتم بالاستكشاف الجيولوجي السطحي أو بطرائق الحفر العميقة، وهي الطرق المثلى لمعرفة سماكة راقات الفحم ونوعيتها وطبيعة الصخور المحتوية عليها. ويجب أن لا تقل سماكة راق الفحم الحجري عن القدم حتى يمكن استثمارها اقتصادياً.

احتياطي الفحم الحجري: تشير التقديرات الحديثة، إلى أن نحو نصف احتياطي فحم العالم يقع في شمال وجنوب الولايات المتحدة. وهذه التقديرات تعتمد على الخرائط الجيولوجية المتوفرة، ومن المحتمل أن تكشف عمليات الاستثمار أن كميات الفحم المتوافرة هي أقل من الاحتياطي المتوقع وجوده، بسبب الانكسارات أو غياب الطبقات أو وجودها بسماكات غير اقتصادية. فمنذ عدد من السنين كانت سماكة الطبقات المستمرة تزيد على ١٠٠ قدم، لكنها تناقصت حالياً إلى نحو ٥ أقدام.

بحري عمليات استخراج الفحم الحجري في كثير من بقاع العالم، وتساهم ولايتا بنسلفانيا وفرجينيا بأكبر جزء من إنتاج العالم. واستناداً إلى التقديرات الحديثة، إن الاحتياطي المتوافر في العالم من الفحم الحجري يغطي تقريباً استهلاك ٢٠٠ سنة

قادمة، إذا استثمر بالمعدل الحاضر نفسه.

### البترول والغاز الطبيعي

يحل البترول والغاز الطبيعي تدريجياً محل الفحم الحجري، نظراً لكونه أكثر فعالية وأسهل تداولاً. وإن توافر المصادر البترولية في الولايات المتحدة، كان له الفضل الأكبر في التطور الصناعي ورفع سوية الحياة فيها. ومع أن مصادر الفحم الحجري وعامات الحديد المتوافرة في بريطانيا قد ساهمت بشكل فعال في ثورتها الصناعية، إلا أنها تشري البترول والغاز من الأقطار الأخرى، نظراً لكون طبيعة أراضيها الجيولوجية لا تحتوي على أحواض ترسيبية ضخمة ملائمة لتطور أحواض البترول والغاز الطبيعي.

ما هو البترول وما هو الغاز الطبيعي تتشكل هاتان المادتان من بقايا المادة الحية التي ارجعت بعملیات فساد أدت إلى تشكيل مواد يدخل فيها الكربون والهيدروجين كمرکبات رئيسة. ويترابط هذان العنصران في أنماط عديدة من التراكيب الكيميائية التي ينتج منها ما يسمى بالفحوم الهيدروجينية. وإن التمييز بين أنواع تلك الفحوم الهيدروجينية يعتمد على عدد ذرات الكربون التي تحتويها. فحين تتحد ذرة من الكربون مع أربع ذرات من الهيدروجين يتشكل مركب يدعى بالميثان Methane ( $CH_4$ )، وتتحد ذرتان من الكربون مع ست ذرات من الهيدروجين يتشكل مركب الايثان  $C_2H_6$ . وإن يختلف الفحوم الهيدروجينية التي تفصل بالتقطير على شكل مشتقات بترولية يمكن إدراجها وفق الجدول التالي:

المشتق	درجة الغليان (فرنهایت)	عدد ذرات الكربون
الغاز	تحت ٩٠	١-٤
الغازولين	١٠٠-٤٠٠	٤-١٢
الناфта	١٢٥-٤٠٠	٧-١٢

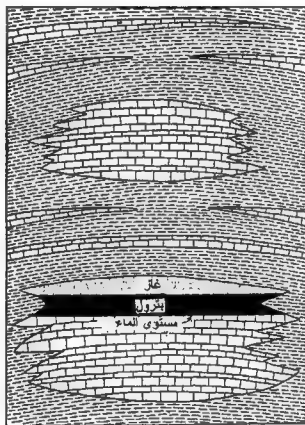
١٥-١٢	٦٠٠-٤٠٠	Kerosine	الكروسين (زيت الكاز)
١٨-١٥	٧٠٠-٤٠٠	Fuel oil	زيت الوقود (المازوت)
٢٠-١٦	فوق ٦٥٠	Lubricating oil	زيت التشحيم
٢٢-١٨	فوق ٦٥٠	Petrolatum	الشمع
٢٤-٢٠	الانصهار ١٣٠-١٢٥	Wax	الشمع
	بقايا	Asphalt	الاسفلت

تحتوي التوضعات الطبيعية للبتروول على الكثير من أنواع الفحم الهيدروجينية مختلطة مع بعضها. وتفصل عن بعضها بالتقطير الجزأ الذي يعتمد على كون المركبات الخفيفة تتبخر بصورة أسرع من المركبات الثقيلة.

**طبقات المصدر Source beds:** تتطور معظم المواد البترولية والغازية بدءاً من بقايا عضوية، كانت قد ترسبت بالأصل في بيئات ترسيب بحرية. وهنالك مثال عن هذه البيئات موجود حالياً وهو البحر الأسود، حيث يتحرك الماء فيه ببطء شديد وتحتوي رسوبات القاع على ما يقرب من ٣٥٪ من المادة العضوية، اذ يقابلها في البيئات البحرية الأخرى ٢,٥٪ فقط. وحين يحصل فساد المادة العضوية في بيئة من هذا النوع تتشكل أوحال عضوية سوداء لزجة تعرف بالسايروبيل Sapropel. ويعتقد أن مواد البترول والغاز الطبيعي تتطور بدءاً من السايروبيل الذي يخضع لسلسلة من التحولات، التي تشبه تحولات التورب نحو الفحم الحجري. وحتى تسم هذه التحولات يجب أن تتوافر ثلاثة شروط أساسية وهي:

- ١- طبقات مصدر يمكن أن تتشكل فيها الفحم الهيدروجينية.
- ٢- طبقة نفوذة خازنة يمكن أن تهجر إليها هذه الفحم الناتجة.
- ٣- موقع مناسب في الطبقة الخازنة يمكن أن تحتجز فيها هذه المواد وهو ما يسمى المصيدة trap.

ويعتقد أن طبقات المصدر الأكثر أهمية هي طبقات الغضار الصفحي البحري، مع أن بعض أنواع الصخور الكلسية وبخاصة الرصيفية يمكن أن تلعب دور صخور مصدر. كما يوجد طبقات واسعة من الغضار الصفحي تشكلت في بيئات ترسيب مياه عذبة، مثل رسوبات الايوسين البحرية في ولايات يوتا Utah والكولورادو ويومينغ Wyoming التي أعطت من ١٠-١٥ غالفونات من البترول في الطين الواحد، وهي تعرف باسم الغضار الصفحي الزيتي oil shales وتشكل مخزوناً مهماً للوقود.

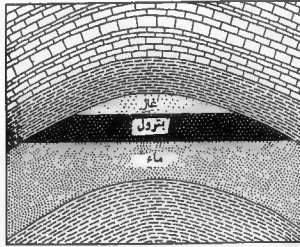


شكل ١٠-١٢: مصيدة بترول وغاز طبيعي في تشكيله رصيفية مرجانية قديمة محاطة بغضار صفحي كثيف.

مواقع الطبقات الخازنة: يعتمد موقع مخزون البترول والغاز الطبيعي على القوانين التي تتحكم في هجرة هذه المواد إلى الصخور الخازنة. ولسوء الحظ لا يمكن حتى الآن فهم طبيعة هذه القوانين، مع أن العديد من العلاقات التجريبية قد

الآن فهم طبيعة هذه القوانين، مع أن العديد من العلاقات التجريبية قد وضعت في هذا المجال.

ويبدو ببساطة أن الثقالة يمكن أن تفسر تركز الكثير من الحقول البترولية. وطبقاً لنظرية الثقالة، فإن البترول والغاز الطبيعي والماء حين توجد في طبقة عازنة، يمكن أن تترتب فوق بعضها تبعاً لثباتين أوزانها النوعية بحيث يقع الغاز في الأجزاء العلوية. وحين يحتجز المخزون في محدب أو قبة تحت تشكيلات كتيمة، فإن مواد البترول والغاز الطبيعي تتجمع على امتداد قمة المحدث أو القبة (شكل ١٢-٢ و ١٢-٣). وإن نظرية التجمع في المحدث ما هي إلا مظهر من مظاهر نظرية الثقالة، وقد أثبتت جلودها عند المنقبين حيث قادتهم إلى الحصول على انتاج هائل من البترول.

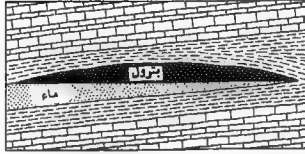


شكل ١٢-٢: مصيدة بترول وغاز طبيعي في داخل تشكيلة نفوذة ذي بنية محدبة.

ويؤخذ على نظرية الثقالة الحالات التي لا يترافق فيها الماء مع البترول والغاز الطبيعي، بحيث يتجمع البترول في منخفض المقعر ويعلوه الغاز الطبيعي، وإن وجود مخازن بترولية من هذا النمط قاد إلى انتقادات للطرائق الجيولوجية التنقيبية التي تعتمد على نظرية التجمع في المحدث.

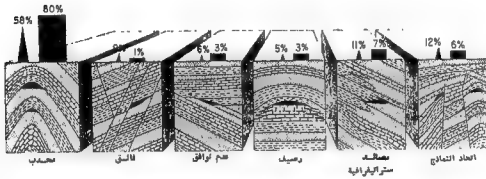
هنالك بنية أخرى مهمة في النظرية الثقالية وهي المصيدة الستراتيغرافية Stratigraphic trap التي تتشكل حين يحتجز البترول والغاز الطبيعي بنطاق من

الصخور ضعيفة النفوذية نتيجة لهجرته الصاعدة.



شكل ١٢-٣: مصيدة سترايغرافية للبنترول على امتداد خط شاطئ قديم

وان هذه الوضعية يمكن أن تتطور مثلاً على امتداد خط شاطئ قديم أو في حواجز رملية قديمة، حيث تتغير السحنة باتجاه أفقي من الرمل إلى الغضار، أو حين تتعرض حركة البنترول والغاز الطبيعي ضمن صخور عازلة نفوذة طبقة كثيفة عند مستوى عدم توافق أو نتيجة لغالتي (شكل ١٢-٤).



شكل ١٢-٤: نماذج مختلفة للمصائد البترولية.

### طرائق استكشاف البنترول والغاز الطبيعي

نظراً لكون تراكيز البنترول والغاز الطبيعي تتطور ضمن رسوبات بحرية سميكة،

لذلك فإن المنقبين يقتصرون تحرياتهم على تشكيلات الصخور الرسوبية. وقد استخدمت طرائق عديدة في هذا المجال تتضمن (١) حفرأً ألياً (٢) تنقيباً اهتزازياً (٣) تنقيباً ثقالياً.

تتم طريقة التنقيب الأولى بحفر عدة آبار متقاربة للاستدلال على بنية وتركيب الصخور الرسوبية تحت السطحية والتوصل إلى وضع خرائط بحمل البنيات العميقة. أما التنقيب الاهتزازي فقد بني على خصائص موجات الهزات الأرضية. حيث يستعمل انفجارات ديناميت صغيرة ضمن حفر بعمق نحو ٥٠ قدماً ومنها تسجل سرعة الموجات الاهتزازية حسب طبيعة الصخور التي تخترقها. ومن خلال سلسلة هذه العمليات يمكن التعرف على البنية الكاملة تحت السطحية. أما مجال التنقيب الثقالي فيعتمد على تباين الوزن النوعي لتشكيلات الصخور الرسوبية. فإذا كانت طبقة رسوبية تقع تحت السطح في وضعية أفقية، فإن أجهزة قياس الثقالة الحساسة تعطي قراءة ثابتة لقوة الثقالة، على طول واتساع هذه الطبقة. ولكن حين تغير وضعية هذه الطبقة فإن قراءات مقياس الثقالة تعكس التغيرات لهذه الطبقة. وعندما تدل القراءات على محذب أو فائق أو بنية أخرى يمكن أن تتجمع فيها المواد البترولية، فإن تنفيذ حفر الآبار الآلي الاختباري يجب أن يتم للكشف عن وجود هذه المواد أو عدمه.

## احتياطي البترول والغاز

لقد الاحتياطي العالمي في البترول نحو ٦١٠ بليون برميل.

## مصادر الطاقة في المستقبل:

يمكن القول أن الطاقة الذرية ستكون أكبر مصادر الطاقة في المستقبل. فالطاقة الصادرة عن الفحم والبترول والغاز تتمثل بطاقة كيميائية مخزنة في الكربونات الذرات، بينما يحرر الوقود الذري كميات كبيرة من الطاقة المحتبسة في نواة الذرة. وبما أن هنالك علاقة متبادلة بين الكتلة والطاقة، فنواة الذرة تحتوي على ٩٩,٩٥٪ من كتلتها وبالتالي كامل الطاقة. وفي الواقع حين تدخل نواة الذرة بتفاعل تسلسلي

تحرر طاقة أكبر بملايين المرات من الطاقة المتحررة بالتفاعل الكيميائي.

**الطاقة الذرية Atomic energy:** إن الطاقة الذرية المختزنة موجودة فقط في عدد قليل من العناصر منها اليورانيوم، وهو عنصر غير ثابت طبيعياً، وقد اكتشف لأول مرة عام ١٩٣٨، إنه عندما يكتسب نظير اليورانيوم  $U^{235}$  نيوتروناً يعطي  $U^{236}$ ، وهذا الأخير ينشطر مباشرة إلى عنصرين خفيفين، ويتمحر نتيجة هذا الانشطار عدد من النيوترونات ترافقها كميات ضخمة من الطاقة. فالنيوترونات المتحررة تضرب نواة الـ  $U^{235}$  وتحوله إلى  $U^{236}$  وهكذا ينتج سلسلة من التفاعلات وكميات هائلة من الطاقة.

إن هذا النوع من التفاعل الذري قد استخدم على مقياس واسع في أول قنبلة ذرية عام ١٩٤٥. وفي الواقع تستعمل الطاقة النووية الآن لتسيير الغواصات وتوليد الطاقة الكهربائية. وسوف تستعمل في المستقبل القريب في تسيير الطائرات.

**خامات اليورانيوم:** يعود منشأ توضعات اليورانيوم إلى النشاط الناري حيث يوجد في الصخور النارية البغماتيتية وفي توضعات العروق. وإن أول خامات اليورانيوم هو فلز اليورانينيت Uraninite وهو معقد أكسيدي ويعرف أحياناً باسم بتشبلاند Pitchblende، وهناك أيضاً معقد أكسيدي آخر هو الكارنوتيت، وهو فلز طري أصفر اللون يوجد في الحجر الرملي في سطحية الكولورادو ويعد المصدر الرئيس لليورانيوم في الولايات المتحدة.

**طرائق استكشاف خامات اليورانيوم:** يتم التنقيب الأولي عن خامات اليورانيوم بواسطة عدد غايغر Geiger حيث يعطي صوتاً مميزاً عندما يمر فوق أرض تحتوي على اليورانيوم.

**احتياطي اليورانيوم:** توجد معظم خامات اليورانيوم في العالم في توضعات بحيرة الدب الأكبر في كندا وفي الكونغو وفي تشيكوسلوفاكيا. ولكن الكميات المهمة منه توجد في الصخور الرسوبية كالحجر الرملي لسطحية الكولورادو وفي الصخور التجمعية في وايت ووترسراند في أفريقيا.



يوجد اليورانيوم 235 بكميات محدودة جداً في العالم بينما يوجد اليورانيوم 238 بكميات أكثر بكثير، تقدر بـ ١٤٠ مرة، ولا يمكن استخدام النوع الأول مباشرة كوقود ذري.

أما احتياطي اليورانيوم بالطن فقير معروف تماماً، ولكن من المحتمل أن تكون الطاقة الكامنة في اليورانيوم الموجود في العالم يساوي احتياطي مجموع احتياطي الطاقة من الفحم والبترول والغاز الطبيعي.

## المصادر الأجنبية

- BATES, R. L., and others. 1973. *Geology: An Introduction* 2nd ed.,  
D.C. Heath and Company, U.S.A.
- DAVIS, S.N., and others. 1976. *Geology: Our Physical Environment*,  
McGraw - Hill, Inc., N.Y.
- FOSTER, R., and SKINNER, B.J. 1974. *Physical Geology* 2nd ed.  
John Wiley & Sons, Inc., N.Y.
- FOSTER, R.J. 1979. *Physical Geology* 3rd ed. Charles E. Merrill  
Publishing Company, Ohio.
- GORSHKOV, G. and YAKUSHOVA, A. 1977. *Physical Geology*.  
Moscow: Mir Publisher.
- HAMBLIN, W. K. and CHRISTIANSEN, E. H. 1995. *Earth  
Dynamic Systems*, 7th ed. Prentic  
-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- HOLMES, A. 1984. *Principles of Physical Geology*, 3ed, ELBs /  
VNR (U.K.) Co. Ltd.

- LEET, L. D. and JUDSON, S. 1965. *Physical Geology*, Prentic - Hall, Inc., Englewood Cliffss, N.J.
- MALLORY, B. F. and CARGO, D. N. 1979. *Physical Geology*, McGrow - Hill, Inc. N. Y.
- MONROE and WICANDER, 1992. *Physical Geology*, West Publishing Co., N. Y.
- MONTGOMERY, C. W. 1987. *Physical Geology*, Wm. C. Brown Publishers, Iowa.
- SKINNER, B. J. and PORTER, S. C. 1987. *Physical Geology* John Wiley & Sons. N. J.
- SPENCER, E. W. 1983. *Physical Geology*, Addison - Wesley Publishing Company, Inc.
- TARBUCK, E. G. and LUTGENS, F. K. 1984. *The Earth: An Introduction to Physical Geology*, Bell & Howell Co. Ohio.
- THOMPSON, G. R. and TURK, J. 1995. *Earth Science and the Enviroment*, Saunders College Publishing. U.S.A.

**المصطلحات العلمية الجيولوجية**  
**الواردة في هذا الكتاب مرتبة حسب الأبجدية الانكليزية**

**(A)**

Ablation	١٦٦	إزالة
Abrasion	١٠١	بري أو مسح
Abyssal zone	٢٥٤	نطاق الأعماق السحيقة
Accumulation	١٦٦	تراكم
Acidic lava	٣١٣	لاها حامضية
Aeration zone	١٢٢	نطاق التهوية
African rift valley	٣٦٢	الوادي الانهدامي الأفريقي
Alder	٢٧٨	النشم
Aleutian islands	٣٧٤	جزر الوثيان
Algae	٢٣٧	أشنيات
Alkali soil	١٤٧	تربة قلوية
Alluvial fans	١١٤	مراوح لحقية
Alluvial soil	٤٥	تربة لحقية
Alluvium	٩٥	لحقيات
Angle of repose	٥٢	زاوية سكون
Anhydrite	٢٧	انهيدريت
Antarctica	١٧٢	قارة القطب الجنوبي
Antarctica archipelago	١٧٦	أرخبيل القطب الجنوبي
Anthropogen	٢٦٧	ظهور الانسان
Anticline fold	٣٥٠	طي محدب
Aquifer layer	١٢٢	طبقة حاملة للماء

Aquifer rocks	١٣٣	صخور حاملة للماء
Artesian well	١٤٤	بئر ارتوازي
Atomic energy	٤١٤	طاقة ذرية
Asymmetric fold	٣٥٠	طى غير متناظر
Atmosphere	١٢	الغلاف الجوى
Atolls	٢٦٣	جزر مرجانية
Avalanche	١٨٢	التيهوز
Axial plane	٣٤٦	مستوى محوري

## (B)

Baikal	٣٦٢	بحيرة بيكال
Bajada	٢٠٧	باهادا
Bar	٣٥٥	بار (وحدة ضغط)
Bar	٨٧	حاجز
Barchan	٢٢١	برخان
Barrier reefs	٢٦٣	أرصفة حاجزة
Base level	٩٢	مستوى القاعدة
Bathyal zone	٢٥٤	نطاق الأعماق
Bauxite	٤٩	بوكسيت
Bed load	٢٠٨	حمولة سريرية
Bedding joints	٣٥٦	فواصل تطبق
Bedding plane	٣٤٥	سطح التطبق
Bedrocks	٤٥	مهد صخري
Bedrocks features	٣٧٤	مظاهر صخرية
Benioff zone	٣٠٢	نطاق بينوف

Benthos	٢٣٦	عضويات قاعية أو لاطئة
Birch	٢٧٨	بيتولا
Bird - foot delta	١١٣	دلتا رجل الطير
Bituminous coal	٤٠٧	فحم حجري
Blowout basins	٢١٣	أحواض النفخ
Body waves	٢٩٠	موجات الجسم
Bog	٢٧٧	مستنقع
Bog soil	٤٧	تربة مستنقعية
Bottomset beds	٢٧٤	طبقات القاع
Boudnage	٣٤١	بوديناج
Boudins	٣٤١	بودين
Boulders	٣٣	جلاميد
Braided channels	٩٠	أقنية مضفورة
Brittle deformation	٣٣٥	تشوه كسور

## (C)

Caldera	٣٢١	كلديرة
Capacity	١٠٠	استيعاب
Capillary fringe	١٢٣	الخاصة الشعرية
Carbonic acid	٣٧	حمض الكربون
Cave	٢٤٩	كهف
Channel patterns	٨٧	نماذج الأقنية النهرية
Chemogenous	٢٧٣	كيميائية المنشأ
Chernozom soil	٥٠	تربة التشيرنوزوم
Cinder volcanoes	٣١٦	براكين الرماد

Cirque	١٦٨	حلبة
Cleopatra's needle	٣٨	مسلة كيلوبترا
Clinometer	١٨٥	مقياس الميل
Coccoliths	٢٣٧	كوكوليت
Collapse sinkhole	١٤٩	بالوعة الانهيار
Colluvium	٦٦	كولوفيوم
Columnar basalt	٣٢٤	بازلت عمداني
Columnar joints	٣٢٤	فواصل عمدانية
Columns	١٥٢	أعمدة
Competence	١٠٠	كفاية
Composite volcanoes	٣١٦	براكين مركبة
Composition of soil	٤١	تركيب التربة
Compound sinkhole	١٤٩	بالوعة مركبة
Compression faults	٣٦٤	فوالق انضغاط
Compression joints	٣٥٨	فواصل انضغاط
Concentration	٣١	تركيز
Cone of depression	١٤١	مخروط الانخفاض
Connate water	١٢١	ماء خلالي
Continental crust	٣٨٢	قشرة قارية
Continental glacier	١٧٢	جليدية قارية
Continental shelf	٢٥٤	رف قاري
Continental shield	٣٧٦	دروع قارية
Continental slope	٢٥٤	منحدر قاري
Coral reefs	٢٦١	أرصفة مرجانية
Corrosion	١٠٢	تآكل
Crater	٣٢٢	بحيرة كريت

Creep	٦٢	زحف
Crestal line	٣٤٨	محط الذروة
Crevasses	١٨١	شقوق (الجليديات)
Cross beds	٢٢١	طبقات متقاطعة
Crystal structure	٢٧	بنية بلورية
Crystallization of salts	١٩	تبلور الأملاح
Cut bank	٨٨	ضفة القطع

## (D)

Dammed lakes	٢٦٩	بحيرات السدود
Death valley	٩٢	وادي الموت
Deflation	٢١٢	تذرية
Deflation armor	٢١٤	درع التذرية
Dendritic drainage	٧٦	تصريف نهري داندريتي
Denudation	١٣	تعرية
Desert pavement	٢١٤	رصيف الصحراء
Desert topography	٢٠٥	طبوغرافية الصحراء
Detrital	٢٧٣	حطامي
Deposition	١٣	ترسيب (توضيع)
Devils tower	٣٢٤	برج الشياطين
Diagonal joints	٣٥٦	فواصل قطرية أو منحرفة
Diamond	٣١	ماس
Diatomite	٢٣٧	مشطورات
Differential stresses	٢٣	جهود تفاضلية
Dip	٣٤٥	ميل



Dip joints	٣٥٦	فواصل ميل
Discharge	٨٣	تدفق أو تصريف نهري
Dissolution	١٤٦	إنحلال
Dissolved load	٩٥	حمولة منحلة
Distributary channels	١١١	أقنية التوزيع
Divides	٧٥	قواسم
Doline	١٤٧	دولين
Drag fold	٣٥٢	طية سحب
Drainage basin	٧٥	حوض تصريف
Drainage patterns	٧٥	أنماط التصريف
Drainage system	٧٥	نظام التصريف
Drift sediments	١٩٢	رسوبات منحرفة
Dripstones	١٥١	صخور القطرات
Dropstones	١٩٦	حجارة التساقط
Drumlin	١٩٥	دروملين
Drumlin fields	١٩٥	حقول الدروملين
Ductile deformation	٣٣٤	تشوه لدن
Dune	٢٢٠	كثيب
Dust bowls	٢١٠	أحواض الغبار

## (E)

Earth's crust	٣٨١	قشرة أرضية
Earth flow	٦٠	تدفق التراب
Earthquake	٢٨٦	زلازل
Earthquakes belts	٣٠٠	أحزمة زلزالية

Earthquake weather cock	٢٩١	ديك الطقس الزلزالي
Earthquakes intenslty	٢٩٦	شدة الزلازل
Echinoids	٢٣٧	قنفذانيات
Effluent streams	١٢٦	أنهار متأثرة
Elastic deformation	٣٣٤	تشوه مرن
Elastic limit	٣٣٤	حد المرونة
Elastic rebound theory	٢٨٧	نظرية الارتداد المرن
Eolian soil	٤٥	تربة هوائية
Epicenter	٢٨٦	مركز سطحي
Erie	٨٥	بحيرة ايري
Erosion	٢١٢	حت
Erratic boulders	١٩٥	جلاميد تالفة
Erratic boulders trains	١٩٥	قافلة الجلاميد التالفة
Eskers sedlments	١٩٨	رسوبات الاسكرز
Estuary	١١٤	خليج نهري
(Eugeosyncline)	٣٨١	رسوبت مياه عميقة في مقعر جيولوجي
Evapotranspiration	٧١	تبخر نتحي
Exfoliation	٣٣	تقشر

## (F)

Facies	٢٥٨	سحنة
Fan fold	٣٥٢	طية مروحية
Fault	٣٥٩	فالق
Fault block mountains	٣٧٧	جبال الكتل الفالقية
Fault breccia	٣٧١	بريش فالقي

Fault drag	٣٧٠	سحب فالقي
Fault plane	٣٥٩	مستوى الفالق
Fault surface	٣٥٩	سطح الفالق
Fault wall	٣٥٩	جدار الفالق
Fault zone	٣٥٩	نطاق الفالق
Features	١٠٥	مظاهر
Fissure eruption	٣٢٣	انفجاعات الشقوق
Flood basalt	٣٢٣	بازلت فيضي
Flood plain	١٠٥	سهل الفيضان
Flwo of rivers	٨٠	تدفق الأنهار
Fjords	١٩١	فيوردات
Fold axis	٣٤٦	محور الطية
Fold limbs	٣٤٨	جناحا الطية
Fold mountains	٣٧٧	جبال الطي
Foot wall	٣٦٠	جدار قديم
Focus	٢٨٦	بؤرة
Fossil	٢٦١	مستحاثات
Fossil soil	٥٠	تربة مستحاثات
Fossil water	١٢٢	ماء مستحاثات
Fractures	١٩	شقوق
Fractures porosity	١٣٠	مسامية الشقوق
Frost wedging	١٥	تجلد اسفيني
Fumaroles	٣٢٥	داخنات اليعسوب

(G)

Gasoline	٤٠٨	غازولين
Genetic features	٢٦٦	ظواهر منشعية
Geosyncline	٣٨٠	مقعر جيولوجي
Geothermal energy	٣٣١	طاقة حرارية أرضية
Geysers	١٣٩	جيزرات
Glacial erosion	١٨٦	حت جليدي
Glacial transport	١٨٦	نقل جليدي
Glacila valley	١٩٠	وادي جليدي
Clacial straition	١٨٦	تخزرات جليدية
Glacier	١٦٢	جليدية
Glacial soil	٤٥	تربة جليدية
Globigerina ooze	٢٥٧	وحل الغلويجييرينا
Gobi	٢٠٤	غوبي
Gold	٣١	ذهب
Graben	٣٦١	غور
Graded stream	٩٣	نهر ممد
Gravity	٢٠٩	ثقالة أرضية
Gravity springs	١٣٦	ينابيع ثقالة
Great basin	٢٠٤	الحوض العظيم
Great glen fault	٣٧٤	فالق غريت غلين
Great plains	٢١٣	المسهول العظيمي
Greenland	١٧٢	جرينلاند
Grooves	١٨٦	أعمايد
Ground moraines	١٩٣	مورينات أرضية

Ground water	١٢٠	مياه جوفية
Ground water table	١٢٥	منسوب الماء الجوفي
Gypsum	٢٧	جص

## (H)

Hanging vally	١٩١	وادي معلق
Hanging wall	٣٥٩	جدار معلق
Hard water	١٤٧	ماء عسر
Headword erosion	١٠٣	حت صاعد
Hematite	٢٦	هيماتيت
Hing fault	٣٦٧	فالق مفصلي
Horn	١٨٩	قرن
Horsetails	٢٧٨	أذنان الخيل
Horst	٣٦١	نجد
Hot spots	٣٢٨	بقع ساخنة
Hot springs	١٣٩	ينابيع حارة
Humic acids	٣٧	حموض دهالية
Humification	٢٨٢	تحول دبال
Humus	٤٣	دبال
Hydration	٢٧	إمالة
Hydraulic action	١٠١	فعل هيدروليكي
Hydraulic gradient	١٣٤	تحد مائي
Hydrogeology	١٢٠	علم الهيدرولوجيا
Hydrolysis	٢٦	حلقة

## (I)

Ice bergs	١٧٦	جزر عائمة
Ice caps	١٧١	قبعات جليدية
Ice sheets	١٧٢	غطاءات جليدية
Ice shelves	١٧٦	رفوف جليدية
Icefall	١٨٢	شلال أو مسقط جليدي
Imaninate world	٤١	عالم الجماد
Immature soil	٤٢	تربة غير ناضجة
Indochina	٣٧٩	الهند الصينية
Inertia	٢٠٩	عطالة
Influent streams	١٢٧	أنهار مؤثرة
Intermediate belt	١٢٣	حزام متوسط
Intermediate zone	١٢٤	نطاق متوسط
Intermittent	٧٤	بحار متقطعة
Internal drainage	٢٠٥	جريان داخلي
Interplate volcanism	٣٢٨	بركنة داخل الصفائح
Invasion	١٥٩	احتياح
Iselberg	٢٠٧	جزر جبلية
Isoclinal fold	٣٥٢	طية متساوية الميل

## (J)

Juvenil water	١٢١	ماء البكر
---------------	-----	-----------

## (K)

Kames sediments	١٩٧	رسوبات الكيم
Karst topography	١٥٠	طبوغرافيا الكارست
Karst windows	١٤٩	نوافذ الكارست
Kinetic energy	٥٣	طاقة حركية

## (L)

Lacustrine soil	٤٥	تربة بحيرية
Lagoon	٢٥٣	بحيرة شاطئية
Lahar	٦٢	لاهار
Laki fissure	٣٢٣	شق لاكمي
Laminar flow	٨٠	تدفق صفائحي
Land slide	٥٤	انزلاق الأراضي
Land subsidence	١٦٠	خسف الأراضي
Lapilli	٣١٤	لابيات
Lateral	٣٦٦	جانبي
Lateral morains	١٩٣	مورينات جانبية
Laterite soil	٤٨	تربة اللاتيريت
Lava	٣١٣	لابا
Lava tunnels	٣٢٤	أنفاق اللابا
Limnology	٢٦٥	علم البحيرات
Lithophage	٣٠٦	ليتوفاغا (أكلات الصخر)
Lithosphere	٢٩٨	الغلاف الصخري
Lithosphere plates	٣٨١	صفائح الغلاف الصخري
Lithostatic pressure	٣٣٨	ضغط صخري توازني

Littoral zone	٢٥٤	نطاق شاطئ
Local base level	٩٢	مستوى قاعدة محلي
Loess deposits	٢٢٤	رسوبات اللوس
Loess dolls	٢٢٨	دمى اللوس
Longitudinal profile	٨٤	بروفيل طولي
Low land bogs	٢٧٨	مستنقعات الأراضي المنخفضة

## (M)

Magnitude	٢٩٩	مقدار
Marine soil	٤٥	تربة بحرية
Material	٣٩٥	مادة
Mature soil	٤٢	تربة ناضجة
Mature stage	١١٦	مرحلة النضج
Meander neck	٨٩	رقبة المنعطف
Meandering channels	٨٨	أقنية المنعطفات
Meanders	٨٨	منعطفات
Mechanical twinning	٣٤٤	فتل ميكانيكي
Mechanical wheathering	١٥	تجوية ميكانيكية
Medial morains	١٩٤	مورينات متوسطة
Mediterranean and trans-asiatic belt	٣٠٣	حزام البحر المتوسط و غير آسيا
Mesotrophic	٢٧٧	متوسط التغذية
Metal	٣٩٥	معدن
Metasomatism	١٥٥	استعاضة
Meteoric water	١٢١	مياه جوية
Mineral	٣٩٦	فلز



(Miogeosyncline)	٣٨١	رسوبات مياه ضحلة في مقعر جيولوجي
Mobile belts	٣٨٢	أحزمة حركية
Molecular attraction	١٣٢	جذب جزئي
Molecules	٨٠	جزيئات
Monoclinial fold	٣٤٩	طية أحادية الميل
Mont Blanc	٥٦	جبل مون بلان
Mouna loa	٣١٨	مونا لوا
Mount mazarna	٣٢٢	جبل مازاما
Mountain building	٣٧٦	بناء الجبال
Mountain systems	٣٧٨	أنظمة جبلية
Mud eaters	٢٧٦	أكلات الأوحال
Mud flow	٦١	تدفق الطين
Mud volcanoes	٣٢٠	براكين طينية

## (N)

Natural levees	١٠٥	سلود طبيعية
Neap tide	٢٤٢	مد محاق
Nektons	٢٣٧	عضويات سباحة
Neritic zone	٢٥٤	نطاق ضحل
Névé	١٦٤	ثلج حبيبي
Normal fault	٣٦٠	فالق عادي
Notches	٢٤٩	فجوات
Nunataks	١٧٣	نواتئ
Non - metal	٣٩٥	لا معدني

## (O)

Oblique slip fault	٣٦٦	فالق الانزلاق المائل
Obsidian	٣٢	زجاج البراكين
Oceanic ridge	٣٨١	عرف محيطي
Oceanic trench	٣٨١	خندق محيطي
Oceanic crust	٣٨٢	قشرة محيطية
Oil shale	٤١٠	غضار صفحي زيتي
Old stage	١١٦	مرحلة الشيخوخة
Oligotrophic	٢٨٠	فقيرة التغذية
Ontario	٨٥	بحيرة أونتاريو
Open system	٥٤	نظام مفتوح
Orogenesis	٣٧٦	تكون الجبال
Organic weathering	١٤	تجوية عضوية
Organisms activities	٢٠	نشاط العضويات
Organogenous	٢٧٣	عضوية المنشأ
Outwash plane	١٩٩	سهل الانجراف
Overtured fold	٣٥١	طية مقلوبة
Oxbow	٨٩	طوق الثور
Oxidation	٢٥	أكسدة

## (P)

Paleosoils	٥٠	ترب قديمة
Parallel drainage	٧٨	تصريف لهري متوازي
Parent rock	٤٥	الصخر الأم
Particles	١١٥	جزيئات

Parts of fold	٣٤٦	أجزاء الطية
Peat	٢٧٧	التورب
Pedaffer soil	٤٧	تربة البيدالفيرا
Pedestal rocks	٢١٦	صخور ارتكازية
Pediment	٢٠٧	بيدمنت
Pedology	٤١	علم التربة
Pelean type	٣٢٠	نموذج بيلي
Peneplain	١١٦	سهل ممهد
Perched water table	١٣٧	منسوب الماء المعلق
percolation	١٣٣	ارتشاح
Perennial	٧٤	بحاري مائية دائمة
Permafrost	٦٢	جمد سرمدي
Permeability	١٣١	نفوذية
Physical weathering	١٤	تجوية فيزيائية
Piedmont glacier	١٧٠	جليدية السفوح
Pillwo lava	٣٧٦	لاها وسائلية
Placer deposits	٣٢	توضعات مكينة
Planktons	٢٣٦	عضويات طافية
Plastic flow	١٧٩	تدفق لدن
Plate tectonics	٣٨١	تكتونية الصفائح
Platinum	٣١	بلاتين
Playa lake	٢٠٧	بحيرة البلايا
Plunge	٣٤٦	تغريق
Plunging fold	٣٤٦	طية غارقة
Point bar	٨٨	حاجز رئيس

Polar glacier	١٧٨	جليدية قطبية
Polyé	١٤٩	بوليه
Pore space	١٣١	فراغ مسامي
Porosity	١٢٨	مسامية
Potential energy	٥٣	طاقة كامنة
Pot - holes	١٠١	حفر وعائية
Pressure melting point	١٧٨	نقطة الانصهار بالضغط
Pressure surface	١٤٥	سطح الضغط
Primary waves	٢٩١	موجات أولية
Process	١٦٤	عملية
Pteropods	٢٢٧	بتروبودا
Pyroclastic	٣١٩	مواد فتاتية نارية

## (Q)

Qattara depression	٢١٣	منخفض القطارة
Quasi - equilibrium	٩٥	شبه متوازن
Quaternary ice age	١٦٢	العصر الجليدي الرابعي

## (R)

Radial drainage	٧٧	تصريف محري شعاعي
Radiolaria	٢٣٧	شعاعيات
Radiolarian ooze	٢٥٧	وحل الشعاعيات
Rain - shadow deserts	٢٠٤	صحارى ظل المطر
Rapids	٨٥	جداول سريعة

Rates of flow	١٨٤	معدلات التدفق
Recharge area	١٤٥	منطقة التغذية
Recrystallization	١٦٤	إعادة تبلور
Rectangular drainage	٧٨	تصريف نهري مستطيل أو متعامد
Recumbent fold	٣٥٠	طلي مسطح
Regolith	٤١	ريغوليت
Regression	٢٣٨	إنسحاب
Replacement	١٥٥	إبدال
Residual	٤١	متبقى
Residual concentration deposits	٤٠١	توضعات التركيز المتبقى
Residual soil	٤٥	تربة متبقية
Reverse fault	٣٦٣	فالق عكسي
Richter scale	٢٩٩	مقياس ريختر
Ridges	٢١٩	حافات
Ripples	٢١٩	ثموجات
Rochés moutonnées	١٩١	صخور غنمية
Rock avalanche	٥٥	تدهور صخري
Rodents	٢١	قوارض
Rolling	٩٧	دحرجة
Runoff water	٧١	مياه جارية

## (S)

Saline - dome tectonics	٣٥٤	تكتونية القباب الملحية
Saltation	٢٠٩	قفز

Saltwater	١٥٩	ماء مالخ
San Andreas fault	٢٨٧	فالق سان اندرياس
Sand blasting	٢١٥	عصف رملي
Sandpaper	١٨٧	سمبادج
Sand ripples	٢١٩	تموجات رملية
Sandstone soil	٤٥	تربة رملية
Saturation zone	١٢٤	نطاق التشبع
Sea arches	٢٥٠	أقواس بحرية
Sea needles	٢٥٠	مسلات بحرية
Secondary waves	٢٩١	موجات ثانوية
Sedges	٢٧٨	السعديات
Sedimentary rocks	١٣	صخور رسوبية
Seif dune	٢٢٣	كبان السيف
Seismogram	٢٩٣	سيسموغرام
Seismograph	٢٩٣	راسم الزلازل
Serrate ridges	١٨٩	تقراء جبلية حادة
Settling velocity	٩٨	سرعة الاستقرار
Shale	٣١	غضار صفحي
Shear waves	٢٩١	أمواج القص (التمزق)
Sheeting	١٩	تصفح
Sheets	١٧	غطاءات
Shield volcanoes	٣١٦	براكين درعية
Sinkhole	١٤٧	بالوعة
Slide rocks	٦٦	صخور انزلاقية
Sliding	٩٧	انزلاق

Slikensides	٣٧٠	سطوح مصقولة
Slip face	٢٢٠	وجه الانزلاق
Slope wash	٧٤	غسل المنحدر
Slump	٥٧	هبوط
Snake river	٣٢٤	نهر السنيك
Snow field	١٦٣	حقل الثلج
Snow line	١٦٣	خط الثلج
Snowflakes	١٦٣	وريقات الثلج
Soil	٤١	تربة
Soil moisture	١٢٢	رطوبة التربة
Soil types	٤٧	نماذج التربة
Solifluction	٦٢	تموج التربة
Solum	٤٤	سولوم
Solution by acids	٢٤	إنحلال بالحموض
Solution by water	٢٢	إنحلال بالماء
Solution porosity	١٣٠	مسامية الانحلال
Solution sinkhole	١٤٨	بالوعة الانحلال
Sorting	٢١٨	فرز
Sphagnum	٢٨٠	طحالب
Spheroidal weathering	٣٣	تجوية كروانية
Spheroid	٣٤	كرواني
Spreading center volcanism	٣٢٧	بركتة مراكز التوسع
Spring tide	٢٤٢	المد الأعظمي أو العالي
Stable minerals	٣١	فلزات ثابتة
Stalactites	١٥١	نوازل
Stalagmites	١٥٢	صواعد

Star dune	٢٢٣	كثبان نجمية
Stones seas	١٦	بحار الحجاره
Stored energy	٥٣	طاقة مختزنة
Straight channels	٨٧	أقنية مستقيمة
Strain	٣٣٥	إجهاد
Strain rate	٣٣٩	معدل الإجهاد
Stratigraphic trap	٤١١	مصيدة ستراتيفرافية
Stratovolcanoes	٣٢٠	غاريط بركانية طبقية
Stream erosion	١٠١	حت لخرى
Stress	٣٣٥	جهد
Strike	٣٤٥	اتجاه
Strike - slip fault	٣٦٥	فالق اتجاه انزلاقي
Strike joint	٢٥٦	فاصل اتجاه
Structural geology	٣٣٤	جيولوجيا البنوية
Subduction	٣٨٢	إنغراز
Subduction zone volcanism	٣٢٧	بركة نطاق الإنغراز
Sublimates	٣٢٥	تصعدات
Subpolar glaciers	١٧٨	جليديات تحت قطبية
Subsidence	٦٥	الخنساف
Subsoil	٤٤	تربة سفلية
Sudden shocks	٦٨	صددمات مفاجئة
Surf zone	٢٤١	نطاق التكسر
Surface soil	٤٣	تربة سطحية
Surface waves	٢٩٠	موجات سطحية
Suspended load	٢١٠	حمولة معلقة
Symmetrical fold	٣٥٠	طية متناظرة



Syncline fold	٣٥٠	طية مقعرة
---------------	-----	-----------

## (T)

Talus	٦٦	تالوس
Talus slope	١٦	منحدر ركام الانهيار (التالوس)
Tension joints	٣٥٧	فواصل شد
Terminal morians	١٩٣	مورينات لهائية
Terrigenous	٢٧٣	أرضية المنشأ
Thermal weathering	١٥	تجوية حرارية
thermokarst lacustrine basins	٢٦٩	أحواض البحيرات الحرارية الكارستية
Throw of fault	٣٦٠	رمية الفالق
Thrust blocks	٣٨٣	كتل التحميل (الفاالق)
Thrust fault	٣٦٤	فالق تحميل أو دثر
Tidal currents	٢٤٢	تيارات المد
Tidal waves	٢٩٨	أمواج المد
Till	١٩٣	ركام جليدي
Top soil	٤٣	تربة عليا
Topographic features	٣٧٢	مظاهر طبوغرافية
Topset beds	٢٧٤	طبقات القمة
Transform faults	٣٠٤	فوالق تحويل
Transgression	٢٨٣	تجاوز
Transition moors	٢٧٨	مستنقعات انتقالية
Transpiration	٧١	التتح
Transportation	١٣	نقل
Transported soil	٤٥	تربة منقولة

Transverse crevasses	١٨٢	شقوقي عرضانية
Trap	٤٠٩	مصيدة
Travertine	١٥٤	ترافرتان
Trellis drainage	٧٧	تصريف نخري عريشي
Tributaries	٧٤	روافد
Triggering	٦٨	إثارة
Triolate glacier	٥٦	جليدية تريوليت
Tropical	٢٠٣	مداري
Trough line	٣٤٨	خط الغور
Trough plane	٣٤٨	مستوى الغور
True soil	٤٤	تربة حقيقية
Tsunami	٢٩٨	تسونامي
Turbidity currents	٢٥٧	تيارات العكر
Turbidity sediments	١١١	رسوبات العكر
Turbulent flow	٨٠	تدفق مضطرب

## (U)

Ultimate base level	٩٢	مستوى قاعدة نهائي
Undertow	٢٤١	تيارات تحت سطحية
Unloading	١٧	تخفيف الحمل
Unpaired terraces	١٠٧	مصاطب غير مزدوجة
Upland moors	٢٧٨	مستنقعات الأراضي المرتفعة
Upper mantle	٣٨١	المعطف العلوي
Uvala	١٤٩	أوفالا

## (W)

Water quality	١٥٦	نوعية الماء
Waterfall	٨٥	شلال أو مسقط مائي
Watersheds	٧٥	مستجمع الأمطار
Wave - cut terrace	٢٤٩	مدرجات الأمواج
Wave motion	٢٣٩	حركة الأمواج
Weathering	١٣	تجوية
Weathering rind	٣٢	لحاء التجوية
Well	١٤١	بئر
Well sorting	٣٨٣	فرز جيد
Wetted perimeter	٨١	محيط مبلل
Wind erosion	٢١٢	الحث الريحي
Wizard island	٣٢٢	جزيرة ويزارد

## (Y)

Yardangs	ياردانج
Yield point	عتبة المرونة
Youth stage	مرحلة الشباب

## (Z)

Zone	٤٢	نطاق
------	----	------

# المحتويات

## الصفحة

## الموضوعات

٣	المنهاج النظري لقرر الجيولوجيا (٢)
٥	مقدمة الطبعة الأولى
٧	مقدمة الطبعة الثانية

## القسم الأول

### العوامل الجيولوجية الخارجية

#### تمهيد

#### الفصل الأول: التجوية وتشكل الترب

١٤	التجوية الفيزيائية:
١٥	- التجوية الحرارية
١٥	- التجوية الميكانيكية
٢١	التجوية الكيميائية:
٢٢	- الانحلال بالماء
٢٤	- الانحلال بالحموض
٢٥	- الأكسدة
٢٦	- الحلمهة
٢٧	- الاماهة

٢٧	بعض نواتج التحوية:
٢٨	- تحوية القرانيت
٣١	- تحوية الغضار
٣١	- تحوية الحجر الكلسي
٣١	تركيز الفلزات الثابتة
٣٢	لحاء التحوية
٣٣	التقشر والتحوية الكروانية
٣٥	العوامل المؤثرة في التحوية
٣٥	التركيب الصعري والبنية الصعرية
٣٧	المناخ
٤٠	التضاريس والطبيعة الطبوغرافية
٤١	<b>التربة وتشكلها</b>
٤١	١- تركيب التربة
٤٢	- مقطع التربة
٤٤	العوامل المتحكممة في تشكل التربة:
٤٥	- العامل الجيولوجي
٤٥	- عامل المناخ
٤٦	- عامل الزمن
٤٦	- العامل العضوي
٤٧	- العامل الطبوغرافي
	نماذج التربة:
٤٧	- تربة البيدالفيرا
٤٨	- تربة اللاتيريت

٥٠	- ترربة التشرونوزوم
٥٠	- الترب القديمة
	<b>الفصل الثاني: تبدد الكتل</b>
٥٢	الثقالة والمنحدر
٥٣	حركة الانقراض الصخرية على المنحدرات
٥٤	تصنيف عمليات تبدد الكتل:
٥٥	- عمليات تبدد الكتل سريعة الحركة
٦٢	- عمليات تبدد الكتل شديدة البطء
٦٥	الانخسافات
٦٦	رسوبات تبدد الكتل
٦٨	اثارة أحداث تبدد الكتل
	<b>الفصل الثالث: المياه الجارية السطحية</b>
٧٠	الدورة المائية في الطبيعة
٧٢	مياه الجريان
٧٤	الأنهار والجاري المائية
٧٥	أنماط التصريف النهري
٨٠	تدفق الأنهار
٨١	العوامل المتحركة في سرعة تدفق مياه الأنهار
٨٤	البروفيل الطولي للقناة النهرية
	نماذج الأقنية النهرية:
٨٧	- الأقنية المستقيمة
٨٨	- أقنية المنعطفات
٩٠	- الأقنية المضفورة

٩٢	مستوى القاعدة
٩٣	النهر المهد
٩٥	نقل الرسوبات بواسطة الأنهار
٩٦	أهمية التدفق المضطرب في نقل الرسوبات
٩٦	حمولة السرير النهري:
٩٨	— الحمولة المعلقة
٩٩	— الحمولة المنحلة
١٠٠	الكفاية والاستيعاب النهري
١٠١	الحث النهري
١٠٣	— تشكل الأودية النهرية
١٠٤	الترسيب النهري
	المظاهر الترسيبية للأنهار:
١٠٥	— السهول اللحقية أو سهول الفيضان
١٠٦	— المصاطب النهرية
١١٠	— الدلتات
١١٤	— المراوح اللحقية
١١٦	التطور الطبوغرافي لليابسة في مناطق المجاري المائية
	<b>الفصل الرابع: المياه الجوفية</b>
١٢٠	أصل المياه الجوفية
١٢٢	توزع المياه الجوفية
١٢٤	عمق المياه الجوفية
١٢٥	منسوب الماء الجوفي
١٢٦	— العوامل المؤثرة في منسوب الماء الجوفي

١٢٧	المسامية والنفوذية
١٣٣	حركة المياه الجوفية
	الينابيع
١٣٦	الشروط الجيولوجية لتشكيل الينابيع
١٣٩	الينابيع الحارة
١٤١	الآبار
١٤٣	حساب تصريف الآبار
١٤٤	الآبار الارتوازية
	النشاط الجيولوجي للمياه الجوفية
١٤٦	الانحلال
	الاشكال الناجمة عن الانحلال:
١٤٧	البالوعات أو الحفر الفائرة
١٤٩	كهوف الانحلال
١٥١	رسوبات كهوف الانحلال
	بعض للمشكلات المياه الجوفية التي يسببها الاستعمال البشري:
١٥٦	نوعية الماء
١٥٨	تخزين النفايات الخطرة تحت الأرض
١٥٩	احتياج المياه المالحة
١٦٠	مخسفات الأراضي
	الفصل الخامس: الجليديات والنشاط الجليدي
١٦٣	تشكيل الجليديات
١٦٦	توازن الكتل الجليدية
	أشكال الكتل الجليدية:



١٦٨	- جليديات الحليات
١٦٨	- جليديات الوادي
١٧٠	- جليديات السفوح
١٧١	- القبعات الجليدية
١٧٢	- الغطاءات الجليدية
١٧٨	- حرارة داحل الجليديات
١٧٩	- حركة الجليديات
١٨٥	- النشاط الجليدي
١٨٦	- النقل الجليدي
١٨٦	- الحث الجليدي

#### المظاهر الحثية في مناطق الجليديات الجبلية:

١٨٨	- الحليات الجليدية
١٩٠	- الوديان الجليدية
١٩١	- الفيوردات
١٩١	- الصحور الغنمية
	- رسوبات الجليديات:
	الركام الجليدي:
١٩٣	- المورينات
١٩٥	- الجلاميد النائية
١٩٥	- الدروملين
١٩٦	- الرسوبات الجليدية البحرية
	رسوبات الجليدية المطبقة:
١٩٧	- رسوبات الكهم

١٩٨	— رسوبات الاسكرز
١٩٩	— رسوبات سهل الانجراف
٢٠٠	اسباب تشكل الجليديات
	<b>الفصل السادس: الرياح والصحاري</b>
٢٠٣	أنواع الصحارى
٢٠٥	طبوغرافية الصحارى
٢٠٨	الفعل الجيولوجي للرياح
	— نقل الرياح للرسوبات:
٢٠٨	— الحمولة الأرضية
٢١٠	— الحمولة المعلقة
	— الحث الريمي:
٢١٢	— التذرية
٢١٥	— البري
	— الرسوبات الريمية:
٢١٨	— الرسوبات الرملية
٢٢٤	— رسوبات اللوس
	<b>الفصل السابع: الفعل الجيولوجي لمياه البحار والمحيطات</b>
٢٢٩	مقدمة عامة
	العوامل الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية:
٢٣١	— درجة الحرارة
٢٣٢	— الضوء والضغط
٢٣٢	— نسبة الأملاح
٢٣٤	— الغازات

٢٣٦	- الحياة العضوية
٢٣٨	العوامل التكتونية
	حركة المياه في المحيطات والبحار:
٢٣٨	- الأمواج
٢٤٢	- تيارات المد
٢٤٤	- التيارات البحرية
	الفعل الجيولوجي لمياه البحار والمحيطات
٢٤٦	- العمل الحقن للأمواج:
٢٤٩	- الفجوات
٢٤٩	- الكهوف
٢٥٠	- الأقواس البحرية
٢٥١	- الشواطئ المتعرجة
٢٥٢	- نقل الرسوبات بواسطة الأمواج
٢٥٣	- توضعات الشواطئ
٢٥٣	الترسيب البحري
٢٥٣	- النطاقات البحرية المختلفة
٢٥٥	- عمليات الترسيب في النطاقات البحرية
٢٥٨	- معدل الترسيب
٢٥٨	- السحنات
	صفات الرسوبات البحرية:
٢٥٩	- التطبيق
٢٦١	- المستحاثات
٢٦١	- الأرصفة المرجانية

## الفصل الثامن: البحيرات والمستنقعات وأهميتها الجيولوجية

٢٦٥

مقدمة

أصل أحواض البحيرات:

٢٦٦

- البحيرات التكتونية

٢٦٧

- البحيرات البركانية

٢٦٧

- البحيرات الجليدية

٢٦٨

- البحيرات النهرية

٢٦٨

- البحيرات الشاطئية

٢٦٩

- بحيرات الأراضي الكلسية

٢٦٩

- بحيرات انزلاق الأراضي

٢٧٠

النظام الهيدرولوجي للبحيرات

٢٧١

التركيب الملحي لمياه البحيرات

٢٧١

النظام الحراري للبحيرات

الفعل الجيولوجي للبحيرات

٢٧٢

الخت البحري

٢٧٣

الترسيب البحري:

٢٧٤

- الترسيب الحطامي

٢٧٦

- الترسيب الكيميائي

٢٧٦

- الترسيب العضوي

٢٧٧

المستنقعات وأهميتها الجيولوجية

٢٧٨

أنواع وتطور المستنقعات

٢٨٠

التوضعات المستنقعية

## القسم الثاني

### العوامل الجيولوجية الداخلية

#### الفصل التاسع: الزلازل

- ٢٨٦ مصدر الزلازل
- ٢٩٠ الموجات الزلزالية
- ٢٩١ - راسم الزلازل
- ٢٩٤ - تحديد مصدر الزلازل
- ٢٩٦ - شدة الزلازل ومقدارها
- ٣٠٠ الأحزمة الزلزالية:
- ٣٠١ - حزام المحيط الهادي
- ٣٠٣ - حزام البحر المتوسط وجزر آسيا
- ٣٠٤ - حزام نظام مرتفعات وسط المحيطات
- تأثيرات الزلازل:
- ٣٠٤ - النار
- ٣٠٥ - تدمير المباني والمنشآت
- ٣٠٦ - التغيرات في مستوى سطح البحر
- ٣٠٦ - الانزلاقات الأرضية
- ٣٠٧ التنبؤ بالزلازل
- ٣٠٩ فوائد الزلازل

#### الفصل العاشر: البراكين

- ٣١١ طبيعة النشاط البركاني
- الحاصلات البركانية:
- ٣١٢ - الحاصلات البركانية الغازية

٣١٣	- الحاصلات اليركانية السائلة
٣١٤	- الحاصلات اليركانية الصلبة
٣١٥	أنواع اليراكين:
٣١٧	- اليراكين الدرعية
٣١٩	- اليراكين المركبة
٣٢٠	- يراكين الرماد
٣٢٠	- نموذج ييلي
٣٢١	الكلديرة
٣٢٣	اندفاعات الشقوق
٣٢٥	داخنات اليرحموم
	توزع النشاط اليركاني:
٣٢٧	- يركنة مراكز التوسع
٣٢٧	- يركنة نطاقات الانغراز
٣٢٨	- اليركنة داخل الصفائح
٣٣٠	اليراكين والحياة البشرية
	<b>الفصل الحادي عشر: تشوه الصخور وتكون الجبال</b>
٣٣٣	مقدمة
	تشوه الصخور
٣٣٥	- التشوه المرن
٣٣٧	- التشوه اللدن:
٣٣٨	- تأثير الحرارة والضغط المحصور
٣٣٩	- تأثير الضغط المحصور والزمن
٣٤٠	- تأثير التركيب الصخري

- ٣٤١ تأثير الهاليل والحرارة  
حدوث التشوه اللدن:
- ٣٤٣ - التشوه اللدن في المعادن  
٣٤٣ - التشوه اللدن في الملح الصخري  
٣٤٤ - التشوه اللدن في الصخور  
الكثيفة
- التشوه بالإلتواءات وتشكل الطيات
- ٣٤٦ - أجزاء الطية  
٣٤٩ - التصنيف الهندسي للطيات  
٣٥٤ - تكتونية القباب الملحية
- التشوه بالعكس وتشكل الفواصل والفوالق
- ٣٥٦ الفواصل:  
٣٥٧ - فواصل الشد  
٣٥٨ - فواصل الانضغاط  
الفوالق:
- ٣٥٩ عناصر الفالق  
تصنيف الفوالق:
- ٣٦٠ - فوالق عادية  
٣٦٣ - فوالق عكسية  
٣٦٥ - فوالق الاتجاه الانزلاقية  
٣٦٦ - فوالق الانزلاق المائل  
٣٦٧ - فوالق مفصلية  
٣٦٨ - فوالق التحويل

- ٣٧٠ دلائل الحركات الفالقية
- دلائل على حدوث التشوهات القديمة:
- ٣٧٢ — المظاهر الطبوغرافية
- ٣٧٤ — المظاهر الصخرية
- ٣٧٥ علاقة الطيات بالفوالق
- ٣٧٦ **تكوين الجبال**
- ٣٧٨ هياكل الأنظمة الجبلية
- نظريات حول تطور الأنظمة الجبلية:
- ٣٨٠ — نظرية التقلص
- ٣٨٠ — نظرية للقعرات الجيولوجية
- ٣٨١ — نظرية تكتونية الصفائح
- ٣٨٥ نهوض أنظمة الجبال
- الفصل الثاني عشر: تطبيقات الجيولوجيا. المواد المفيدة والطاقة**
- ٣٩٥ المواد
- التركيز بالنشاط الناري
- ٣٩٦ التركيز الفلزي:
- ٣٩٦ — الماس
- ٣٩٧ — البلاتين والنيكل والكروم
- ٣٩٨ — الذهب والنحاس والقصدير
- التركيز بالتجوية:
- ٤٠٠ — مواد متبقية
- ٤٠١ — محاليل متبقية
- ٤٠٢ التركيز بعمليات ترسيبية



- ٤٠١ محاليل متبقية
- ٤٠٢ التركيز بعمليات ترسيبية
- التركيب الأصلي للصخور:
- ٤٠٤ - الصخور الفوسفاتية
- ٤٠٥ - الاسبتوس
- ٤٠٥ - الصخور الملحية
- مصادر الطاقة المتوفرة اليوم
- الطاقة الكيميائية:
- ٤٠٦ - الفحم الحجري
- ٤٠٧ - التنقيب عن الفحم الحجري
- ٤٠٨ - البترول والغاز الطبيعي
- ٤٠٩ - طبقات المصدر
- مواقع الطبقات
- ٤١٢ - طرق استكشاف البترول والغاز الطبيعي
- مصادر الطاقة في المستقبل
- ٤١٤ الطاقة الذرية
- ٤١٦ المصادر الأجنبية
- ٤١٨ المصطلحات العلمية الجيولوجية







مطبعة دار البين

رقم ٤١٨

طبع بإشراف لجنة الانجاز

سعر المبيع للطلاب ١٧٥ ل.س